

УДК 523-52

КОЛИЧЕСТВО ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, И ОБРАЗОВАНИЕ ЛУННЫХ КРАТЕРОВ В ТЕЧЕНИЕ ПОСЛЕДНЕГО МИЛЛИАРДА ЛЕТ

© 2020 г. С. И. Ипатов^{a, *}, Е. А. Феоктистова^b, В. В. Светцов^c

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

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

^cИнститут динамики геосфер РАН, Москва, Россия

*e-mail: siipatov@hotmail.com

Поступила в редакцию 13.06.2019 г.

После доработки 06.03.2020 г.

Принята к публикации 18.03.2020 г.

Проведено сравнение количества лунных кратеров с диаметром, большим 15 км, и возрастом менее 1.1 млрд лет с оценками числа кратеров таких размеров, которые могли образоваться за 1.1 млрд лет, если бы количество объектов, сближающихся с Землей, и элементы их орбит за это время были бы близки к их современным значениям. Сравнение проводилось для кратеров на всей поверхности Луны и для области в районе Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. При этих оценках использовались значения вероятностей столкновений объектов, сближающихся с Землей, с Луной, а также зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников. Число известных коперниканских кратеров с диаметром $D \geq 15$ км на единице площади на морях по оценкам различных авторов не менее, чем в двое, превышает аналогичное число для остальной поверхности Луны. Наши оценки не противоречат увеличению количества объектов, сближающихся с Землей, после возможных катастрофических разрушений больших астероидов главного пояса, которые могли произойти в течение последних 300 млн лет, но и не доказывают это увеличение. В частности, они не противоречат выводу работы (Mazouei и др., 2019) о том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени возросло в 2.6 раза 290 млн лет назад. Число коперниканских лунных кратеров с диаметром, не меньшим 15 км, возможно больше, чем по данным (Mazouei и др., 2019). При вероятности столкновения с Землей за год объекта, пересекающего орбиту Земли, (ОПОЗ), равной 10^{-8} , наши оценки числа кратеров соответствуют модели, в которой число 15-км коперниканских кратеров на единице площади для всей поверхности Луны было бы таким же, как и для области морей, если бы данные (Losiak и др., 2015) для $D < 30$ км были бы такими же полными, как и для $D > 30$ км. При такой вероятности столкновения ОПОЗ с Землей и для такой модели темп кратерообразования за последний 1.1 млрд лет мог быть постоянным.

Ключевые слова: объекты, сближающиеся с Землей, лунные кратеры, столкновения

DOI: 10.31857/S0320930X20050011

ВВЕДЕНИЕ

В Солнечной системе имеется большое число малых тел. Некоторые из них путешествуют по Солнечной системе и могут сталкиваться с планетами и их спутниками, образуя кратеры. На Луне и других безатмосферных телах кратеры сохраняются в течение длительного периода (миллиарды лет), так как на таких телах отсутствует воздействие атмосферы и воды. Сохранность кратеров на Луне также обеспечивается тем, что за последний миллиард лет на ней не происходили значительные геологические эндогенные процессы (Ударные кратеры, 1983). Процесс образования ударного кратера был предметом многих научных исследований (Gault и др., 1968; Hartmann, 1972;

Melosh, 1989). Hartmann (1972) показал, что переход от простых к сложным кратерам определяется величиной силы тяжести. К сложным кратерам относят более крупные кратеры с террасами на стенках, центральными горками и плоским дном (Melosh, 1989). В ряде исследований (см. Kruger и др., 2015) были предложены различные (от 15 до 20 км) значения диаметра кратера, при котором на Луне происходит переход от простых кратеров к сложным, причем этот диаметр может отличаться для материковых и морских районов Луны (Kruger и др., 2018). Для кратеров на Земле этот переход происходит при диаметре, равном 3.2 км (Melosh, 1989). Процесс образования ударного кратера детально описан в работах (Gault и др.,

1968; Melosh, 1989) и делится на три стадии: стадия контакта, стадия экскавации и стадия модификации. На первой стадии ударник (метеороид, комета, астероид) сталкивается с поверхностью мишени (планеты, спутника). После стадии контакта наступает стадия экскавации. В результате процесса экскавации образуется так называемый “переходный кратер”, размеры которого значительно превышают размеры ударника. Последняя стадия кратерообразования – стадия модификации. Процесс модификации переходного кратера и образования сложного кратера был детально рассмотрен в работе (Melosh, Ivanov, 1999). Croft (1981; 1985) предложил соотношения между диаметром переходного кратера и диаметром окончательного сложного кратера на Луне и Земле.

Для оценки параметров ударников по характеристикам образовавшихся кратеров используют законы подобия, то есть экстраполяцию экспериментальных данных на события более крупного масштаба. Roddy и др. (1977) предложили метод ударно-взрывной аналогии, в котором энергия заряда была заменена кинетической энергией ударника. Dienes и Walsh (1970) разработали метод эквивалентности на поздней стадии, устанавливающий закон подобия между диаметром переходного кратера и размером ударника. Данный метод получил развитие в работах (Holsapple, Schmidt, 1980; 1982; 1987; Schmidt, Housen, 1987). Закон подобия по π – группам, основанный на анализе размерностей физических величин, определяющих процесс кратерообразования, был предложен в 1914 г. Букингемом (Buckingham) и подробно описан в книге (Melosh, 1989). Данный метод был применен в ряде исследований для установления соотношения между диаметром переходного кратера и характеристиками мишени и ударника (например, Pierazzo, Melosh, 2000; Ivanov и др., 2001) и, кроме того, соотношения подобия широко используются в интернете для оценок размера кратера по заданным параметрам ударяющего тела (Collins и др., 2005).

В работах (Gilbert, 1893; Shoemaker, 1962) было показано, что углы падения ударников распределены случайным образом с максимумом при 45° . Согласно заключению Melosh (1989), основное влияние величина угла падения оказывает на форму выбросов из кратера, а не на сам кратер. Зависимость отношения диаметра кратера к диаметру ударника или эффективности кратерообразования (отношение массы, выброшенной из кратера, к массе ударника) от угла падения ударника исследовалась в ряде работ путем численного моделирования (например, Ivanov, Artemieva, 2001; 2002; Elbeshausen и др., 2009; Davison и др., 2011; Elbeshausen и др., 2013). Очевидно, что эффективность кратерообразования уменьшается с уменьшением угла падения. Elbeshausen и др. (2009), проведя расчеты для углов падения от 30°

до 90° (вертикальный удар) при скорости удара 6.5 км/с, получили, что эффективность образования переходного кратера зависит от синуса угла в некоторой степени, которая зависит от коэффициента трения. При малых углах удара переходный кратер может иметь вытянутую форму, причем пороговый угол перехода к эллиптическим кратерам уменьшается с уменьшением прочности мишени (Davison и др., 2011).

Зная связь между диаметром кратера и диаметром ударяющего тела при средних скоростях и углах падения, из наблюдений, анализа и подсчета ударных кратеров на Луне можно определить поток тел, которые образуют эти кратеры. В (Астероидно-кометная опасность, 2010; Werner, Ivanov, 2005) считается, что в течение последних 3 млрд лет поток кратерообразующих тел был примерно постоянным, а примерно 4 млрд лет назад поток кратерообразующих тел был в 100–500 раз выше современного. Данные о лунных кратерах с диаметром менее 100 м позволили предположить, что поток кратерообразующих тел был примерно постоянен в последние 100 млн лет (Астероидно-кометная опасность, 2010). Bottke и др. (2007) предположили, что около 160 млн лет назад в астероидном поясе могло произойти разрушение астероида, фрагменты которого образуют семейство Баптистины (большая полюсь орбиты астероида (298) Baptistina равна 2.26 а. е.), что вызвало увеличение потока бомбардирующих тел.

Анализируя возрасты кратеров коперниковского периода (т.е. кратеров с возрастом менее 1.1 млрд лет), Mazgouei и др. (2019a) пришли к выводу о том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени возросло примерно в 2.6 раза 290 млн лет назад. В (Mazgouei и др., 2019a) оценки возраста кратеров основывались на использовании данных радиометра Diviner зонда LRO (на анализе теплофизических характеристик выброшенного при ударах вещества), и отмечался также дефицит земных кратеров с возрастом между 300 и 650 млн лет и почти их полное отсутствие для более позднего возраста. Предположение об увеличении числа кратеров, образовавшихся за единицу времени, в 2 раза за последние 300 млн лет делалось и ранее в (McEwen и др., 1997) на основе изучения ярких лучей выбросов, исходящих из кратеров. В этой работе считалось, что кратеры с лучами на обратной стороне Луны имеют возраст менее 1 млрд лет.

В настоящей работе рассматривается возможное изменение потока кратерообразующих тел в течение последнего миллиарда лет и обсуждается возможность увеличения этого потока в течение последних 300 млн лет. Эти оценки основаны на сравнении оценок числа кратеров с возрастом не более 1.1 млрд лет, приведенных в работах (Mazgouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2011), с нашими

оценками, сделанными при предположении, что число и орбиты околоземных объектов в течение последних 1.1 млрд лет были примерно такими же, как в настоящее время. Наши оценки используют данные о числе околоземных объектов, оценки вероятностей столкновений околоземных объектов с Луной, и зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников.

Ранее (Ipatov и др., 2018; 2020) оценки числа кратеров коперниковского периода проводились нами на основе базы данных (Losiak и др., 2011) и дополнительно рассматривались кратеры с неподтвержденным возрастом первой (т.е. наилучшей) степени сохранности на основании Морфологического каталога лунных кратеров ГАИШ (Родионова и др., 1987). Из этих кратеров только один попал в таблицу, рассматриваемую в (Mazrouei и др., 2019a). Поэтому в настоящей статье мы такие кратеры не рассматриваем.

При оценках числа кратеров мы использовали каталог лунных кратеров (Losiak и др., 2015), включающий информацию о возрасте кратеров на основе работ (Wilhelms, 1987; Wilhelms, Byrne, 2009), а также данные из работы (Mazrouei и др., 2019a). Оценки возрастов кратеров в работах (Wilhelms, 1987; Wilhelms, Byrne, 2009) были сделаны на основе статистики кратеров и оценки степени их сохранности. К коперниковскому периоду согласно данным (Losiak и др., 2015) относятся только 66 кратеров с диаметрами $D \geq 10$ км, при этом в районе морей видимой стороны Луны расположены 38 из них. На обратной стороне Луны морей гораздо меньше, чем на видимой стороне, и они небольшого размера. Сравнение данных из каталога (Losiak и др., 2015) с распределением, представленным кривой Нойкума по формуле (21) с коэффициентами из табл. 1 из (Werner, Ivanov, 2015), показывает неполноту этих данных для кратеров с $D < 30$ км (рис. 1). В работе (Mazrouei и др., 2015) для оценки возраста кратеров, образовавшихся в течение последнего миллиарда лет, были использованы данные радиометра Diviner зонда LRO. Mazrouei и др. (2015) исходили из того, что теплофизические свойства материалов, слагающих выбросы кратеров, зависят от возраста этих кратеров. У более молодых ударных структур материалы выбросов в значительной степени состоят из крупных обломков пород, тепловая инерция и, следовательно, температура которых отличается от соответствующих параметров окружающего материала. Радиометром Diviner была собрана информация об изменении температуры поверхности Луны в течение лунных суток. С помощью этой информации авторы работы (Mazrouei и др., 2015) выделили на поверхности кратеры, возраст которых не превышает 1 млрд лет. Полученные результаты хорошо согласуются с распределением для кратеров коперниковского периода, рассмотренным в (Werner, Ivanov, 2015).

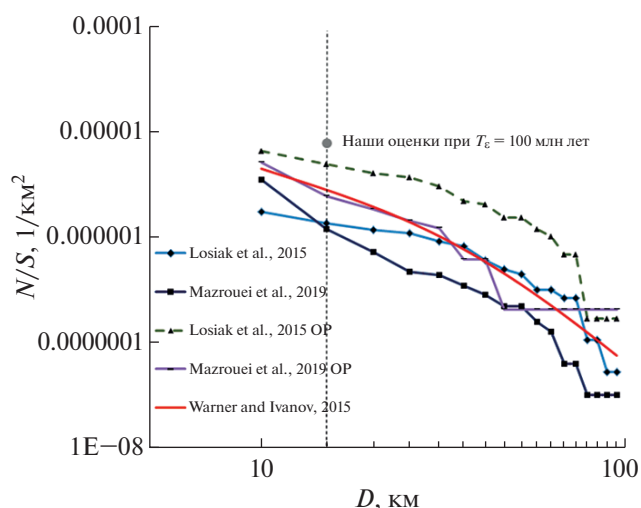


Рис. 1. Распределение числа N/S лунных кратеров с возрастом менее 1.1 млрд лет с диаметрами, превышающими D , на единице площади по данным (Losiak и др., 2015), (Mazrouei и др., 2019a) и (Werner, Ivanov, 2015). Буквами OP помечены данные для области Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. Остальные данные приведены для всей поверхности Луны. Круглый значок соответствует нашим оценкам N/S при характерном времени до столкновения ОПОЗ с Землей T_E , равном 100 млн лет (то есть при вероятности столкновения ОПОЗ с Землей за 1 год равной 10^{-8}). Вертикальная линия соответствует $D = 15$ км. Штрихи на оси абсцисс приведены через 5 км.

Однако в работе (Mazrouei и др., 2019a) количество кратеров, относящихся к коперниковскому периоду, было пересмотрено: согласно новым результатам их число с диаметром более 10 км составляет всего 111 кратеров, из которых только 25 расположены в районе морей видимой стороны Луны. При этом авторы данной работы отмечают возможное увеличение потока крупных ударников около 290 млн лет назад. В работе (Mazrouei и др., 2019a) выдвинуто предположение, что это увеличение может быть следствием выпадения на поверхность Луны крупных фрагментов, образовавшихся в результате разрушения одного или нескольких астероидов в главном поясе.

Для оценки возраста кратеров в (Ghent и др., 2014; Mazrouei и др., 2019a) использовалось сравнение с 9 кратерами, возраст которых был установлен независимо. В работе Hergarten и др. (2019) оценки возрастов кратеров из (Mazrouei и др., 2019a) были подвергнуты сомнению. Hergarten и др. (2019) отметили, что могут быть и другие трактовки наблюдаемых данных и что данных о девяти кратерах, используемых в (Ghent и др., 2014; Mazrouei и др., 2019a) для калибровки их модели, использующей степенной закон, может быть недостаточно для опровержения экспоненциальной модели. Mazrouei и др. (2019b) привели

Таблица 1. Размеры и координаты кратеров с возрастом не более 1.1 млрд лет по данным (Losiak и др., 2015). Кратеры, расположенные в районе Океана Бурь и морей видимой стороны Луны, отмечены *

№	Имя	Широта	Долгота	Диаметр, км	Глубина, км	Отношение глубины кратера к диаметру	Возраст, млрд лет
1	Вавилов	-0.9	-138.8	98.2	6	0.061	≤1.1
2	Коперник*	9.6	-20.1	96.1	3	0.031	0.8
3	Хайн	64.6	83.9	86.2	3.6	0.042	≤1.1
4	Тихо	-43.3	-11.2	85.3	4.5	0.052	≤1.1
5	Кинг	5	120.5	76.2	3.8	0.05	≤1.1
6	Стевин*	-32.5	54.1	71.5	3.8	0.053	≤1.1
7	Джексон	22.1	-163.3	71.4	4.7	0.066	≤1.1
8	Филолай*	72.2	-32.9	71.4	3.8	0.053	1.02
9	О'Дей	-30.4	157.3	70.4	3.8	0.054	≤1.1
10	Евдокс*	44.3	16.2	70.2	4.5	0.064	≤1.1
11	Цукки*	-61.4	-50.7	63.2	3.6	0.057	≤1.1
12	Ом	18.3	-113.8	61.8	4.5	0.072	≤1.1
13	Карпенгер*	69.5	-51.2	59.1	3.8	0.064	≤1.1
14	Тарунций*	5.5	46.5	57.3	1.5	0.026	≤1.1
15	Аристилл*	33.9	1.2	54.4	3.85	0.071	1.1
16	Анаксагор*	73.5	-10.2	51.9	4.2	0.081	≤1.1
17	Резерфорд	-61.2	-12.3	50	3	0.06	≤1.1
18	Крукс	-10.4	-165.1	48.3	4.5	0.093	≤1.1
19	Белькович	63.6	93.6	47	2	0.042	≤1.1
20	Винер Ф	41.2	150	44.9	3.3	0.073	≤1.1
21	Бюрг	45.1	28.2	41	3.25	0.079	≤1.1
22	Глушко*	8.1	-77.7	40.1	2.2	0.051	≤1.1
23	Аристарх*	23.7	-47.5	40	3.2	0.08	0.13–0.18
24	Гарпал*	52.7	-43.5	39.8	3.4	0.085	0.26
25	Виртанен	15.6	176.7	39.7	3.3	0.083	≤1.1
26	Автолик*	30.7	1.5	38.9	3.7	0.095	≤1.1
27	Палич В	-26.4	68.4	37.9	3.1	0.082	≤1.1
28	Гутник	-47.8	-94	37	4	0.11	≤1.1
29	Нехо	-5.3	123.2	36.9	3.8	0.10	≤1.1
30	Милн Н	-35.8	111.3	36.8	3.1	0.084	≤1.1
31	Дас	-26.5	-137.1	36	3.5	0.097	≤1.1
32	Годен*	1.8	10.2	34.3	3.2	0.093	≤1.1
33	Гассенди А*	-15.6	-39.8	32.2	3	0.093	≤1.1
34	Петавий В*	-19.9	57	32	3	0.094	≤1.1
35	Фалес*	61.7	50.3	30.8	3.5	0.114	≤1.1
36	Кеплер*	8.1	-38	29.5	2.9	0.098	0.625–1.25
37	Шомбергер А	-78.6	23.5	29.4	2.9	0.099	≤1.1
38	Биркхоф Z	61	-145.9	28.6	2.9	0.101	≤1.1
39	Фарадей С	-43.3	8	28.5	2.9	0.102	≤1.1
40	Медлер*	-11	29.8	27.6	3	0.11	≤1.1
41	Прокл*	16.1	46.9	26.9	4	0.143	≤1.1
42	Триснеккер*	4.2	3.6	25	2.7	0.108	≤1.1
43	Местинг*	-0.7	-5.9	24.4	2.9	0.12	≤1.1

Таблица 1. Окончание

№	Имя	Широта	Долгота	Диаметр, км	Глубина, км	Отношение глубины кратера к диаметру	Возраст, млрд лет
44	Джордано Бруно	36	102.9	22.1	2.7	0.122	≤1.1
45	Конон*	21.7	2	21	2.7	0.128	≤1.1
46	Табит А*	-21.6	-4.9	19.9	2.6	0.131	≤1.1
47	Лихтенберг*	31.9	-67.7	19.5	2.6	0.133	≤1.1
48	Пифей*	20.6	-20.6	18.8	2.5	0.133	≤1.1
49	Дауэс*	17.2	26.3	18	2.2	0.122	≤1.1
50	Белло*	-12.5	48.2	17.5	3	0.17	≤1.1
51	Дионисий*	2.8	17.3	17.3	3	0.158	≤1.1
52	Резерфорд	10.6	137.1	16	2	0.125	≤1.1
53	Жансен К	-46.2	42.3	15	2.4	0.16	≤1.1
54	Мессье*	-1.9	47.7	13.8	2.2	0.16	≤1.1
55	Тарп	-30.6	145.6	13.5	2.2	0.162	≤1.1
56	Милихий	10	-30.2	12.2	3	0.245	≤1.1
57	Гамбар А*	1	-18.8	11.6	2.3	0.198	≤1.1
58	Сульпиций Галл*	19.6	11.7	11.6	2.3	0.198	≤1.1
59	Фурнерий А	-33.5	59	11.2	2.3	0.205	≤1.1
60	Петавий С*	-27.7	60	11.2	2.2	0.198	≤1.1
61	Годдард А*	17.1	89.7	11.1	2.2	0.202	≤1.1
62	Камерон*	6.2	45.9	10.9	2.2	0.202	≤1.1
63	Энке В*	2.4	-36.8	10.9	2.1	0.196	≤1.1
64	Кеплер А*	7.1	-36.1	10.7	2.1	0.198	≤1.1
65	Фраунгофер С	-38.5	58.4	10.6	2.1	0.21	≤1.1
66	Бессарион*	14.9	-37.3	10	2.2	0.198	≤1.1

аргументы в защиту своей модели. Анализируя возрасты кратеров, Kirchoff и др. (2013) пришли к выводу, что между 3 и 1 млрд лет были возможны длительные периоды (более 600 млн лет) с относительно небольшим числом столкновений, сменявшиеся более короткими (около 200 млн лет) периодами более интенсивной бомбардировки.

При наших оценках использовались данные о числе коперниканских кратеров, как для всей поверхности Луны, так отдельно для области Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. В последнем разделе эти данные сравниваются с нашими оценками числа кратеров, которые могли бы образоваться на Луне за 1.1 млрд лет при условии, что распределение объектов, пересекающих орбиту Земли, (ОПОЗ, ЕСОs) по их числу, массам, плотностям и элементам гелиоцентрических орбит за 1.1 млрд лет в среднем было примерно таким же, как и в настоящее время. В остальных разделах обсуждаются данные, используемые при этом сравнении, в частности, зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников. Сравнение числа известных коперниканских кратеров с данными для

рассматриваемых моделей проводилось для нескольких оценок вероятностей столкновений ОПОЗ с Землей (Werner, Ivanov, 2015; Емельяненко, Нароенков, 2015; Granvik и др., 2018; Bottke и др., 1994; Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999; Ипатов, 2000; Ipatov, Mather, 2004a). Отношение вероятностей столкновений объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ) к вероятностям их столкновений с Луной считалось равным 22 (Le Feuvre, Wieczorek, 2011).

ДИАМЕТРЫ УДАРНИКОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ДИАМЕТРАМ ЛУННЫХ КРАТЕРОВ

Для определения связи диаметра ударного кратера с диаметром ударяющего тела мы использовали широко известное, основанное на экспериментах, соотношение (Schmidt, Housen, 1987), которое для вертикальных ударов записывается следующим образом в системе СИ (Collins и др., 2005; Werner, Ivanov, 2015):

$$D_{tc} = 1.16(\rho_i/\rho_t)^{1/3} D_p^{0.78} U^{0.44} g^{-0.22}, \quad (1)$$

где D_{tc} – это диаметр переходного кратера, ρ_i и ρ_t – плотности ударяющего тела и мишени, D_p – диаметр ударника, U – скорость удара, g – ускорение свободного падения. Для определения диаметра конечного сложного кратера D_v (по валу) можно использовать соотношение (Croft, 1981; 1985; Werner, Ivanov, 2015)

$$D_v = D_{sc}^{-0.18} D_{tc}^{1.18}, \quad (2)$$

где D_{sc} – диаметр кратера, при котором происходит переход от простых кратеров к сложным. Этот диаметр для Луны равен примерно 15 км, а для Земли – 3.2 км (Melosh, 1989). Заметим, что неточность в определении D_{sc} , вследствие небольшого показателя степени 0.18 в формуле (2), дает ошибку лишь в несколько процентов. Учитывая формулу (1), формулу (2) можно преобразовать к виду

$$D_v = 1.18 D_{sc}^{-0.18} (\rho_i/\rho_t)^{0.393} D_p^{0.92} U^{0.52} g^{-0.26}. \quad (3)$$

Используя $D_{sc} = 15$ км и ускорение свободного падения для Луны и считая, что плотности ударяющего тела и мишени равны, из соотношения (3) для сложных кратеров с диаметром более 15 км легко получить, что диаметр конечного кратера, D_v (в км), для вертикального удара равен

$$D_v = 3.94 D_p^{0.92} U^{0.52} = 3.94 (D_p U^{0.57})^{0.92}, \quad (4)$$

где D_p – диаметр ударника в км, а U – скорость удара в км/с. Размер кратера зависит также от угла удара (между вектором скорости и поверхностью) θ примерно как $(\sin\theta)^{1/3}$ (Melosh, 1989; Collins и др., 2005). Принимая во внимание, что вероятность удара с углом θ равна $\sin 2\theta$, для определения среднего (по углам) значения диаметра кратера нужно проинтегрировать выражение (4), умноженное на $(\sin\theta)^{1/3} \sin 2\theta$, по углам от 0° до 90° . В результате мы получим выражение (5), аналогичное (4), в котором коэффициент 3.94 заменен на 3.2:

$$D_v = 3.2 D_p^{0.92} U^{0.52} = 3.2 (D_p U^{0.57})^{0.92}. \quad (5)$$

Зависимость D_v наиболее чувствительна к U . Поскольку $U^{0.57 \times 0.92}$ близко к $U^{0.5}$, то D_v изменяется примерно в 2 раза, если U меняется в 4 раза. На рис. 11 в (Minton и др., 2015) отношение D_c/D_p диаметра кратера к диаметру ударника варьировалось более чем в 10 раз при одном и том же значении D_p для разных возможных скоростей ударов.

Среднеквадратичная скорость столкновений с Луной бывших астероидов главного пояса, мигрировавших к орбите Земли, в (Minton и др., 2015) считалась равной 18.3 км/с. Однако скорости столкновений на рис. 10 этой работы находились в диапазоне от 7 до 50 км/с. Средняя скорость столкновения с Луной равнялась 19.3 и 19.7 км/с в (Le Feuvre, Wicczorek, 2011) и (Stuart, Binzel, 2004), соответственно. Основным источником

околоземных объектов считается астероидный пояс. Однако некоторая часть объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ) приходит с больших расстояний от Солнца. Для тел, приходящих из-за орбиты Юпитера и выпадающих на Землю, типичные скорости столкновений с Землей немного больше, чем для ОСЗ, пришедших из астероидного пояса. В (Маров, Ипатов, 2018) типичные скорости таких тел, попадавших в сферу действия Земли, были оценены в диапазоне 21–24 км/с. В (Ипатов, 2000) отмечалось, что среди тел, пришедших из зон планет-гигантов, доля тел, орбиты которых пересекают орбиту Земли, на порядок больше доли тел, орбиты которых пересекают только орбиту Марса, и обычно их эксцентриситеты превышают 0.6. Так как для известных астероидов это не так, то эти результаты указывают на то, что большинство астероидов группы Амура должно было прийти из астероидного пояса, а не из-за орбиты Юпитера. Астероидный источник ОСЗ считается основным и во многих других работах различных авторов. В (Granvik и др., 2018) считается, что более 90% ОСЗ имеют астероидное происхождение.

На основании формулы (5) получаем, что средний диаметр D_v кратера, который создается ударниками с диаметром $D_p = 1$ км, составляет 14.7, 15.3 и 16.9 км для скоростей ударов, равных 18.3, 19.7 и 24 км/с соответственно. То есть разброс значений D_v при таком диапазоне скоростей сравнительно небольшой. Ниже мы используем значение $D_v = 15$ км.

Werner и Ivanov (2015) для Земли получили формулу, близкую к формуле (5), с коэффициентом 4 и немного другими степенями (0.58 вместо 0.57, и 0.91 вместо 0.92). Эта формула основана на численных расчетах, опирающихся на ряд допущений. Численное моделирование образования кратеров при вертикальных ударах по Луне проводилось в работе (Silber и др., 2017) для нескольких скоростей столкновений. В этих расчетах предполагалось, что ударник состоит из дунита, плотность которого 3.32 г/см³, а мишень – из гранита с плотностью 2.63. Формула (4) для вертикальных ударов выведена для равных плотностей ударника и мишени. Поэтому, при сравнении с результатами расчетов Silber и др. (2017), надо (4) домножить на отношение плотностей 3.32/2.63 в степени 0.393. Это увеличивает оценку диаметра кратера на 10%. В итоге оказывается, что отличие формулы (4) с поправкой на разность плотностей от результатов Silber и др. (2017) для сложных кратеров не превышает 5%.

Используя формулу (3), сравним диаметры кратера для Луны и Земли. Множитель $D_{sc}^{-0.18} \approx 0.757$, а $g^{0.26} \approx 1.60$. Их произведение равно 1.2. То есть при одинаковых плотностях Земли и Лу-

ны (см. приведенные ниже ссылки) и одинаковых параметрах ударника, диаметр кратера на Луне в 1.2 раза больше, чем на Земле. В частности, если удар по Земле образует кратер диаметром 15 км, то такой же удар по Луне образует кратер размером 18 км. Средняя плотность пород в земной коре равна 2.7 г/см^3 (Короновский, 2018). Плотность лунной коры различна в различных областях и по данным космического аппарата GRAIL варьируется от 2.3 до 2.9 г/см^3 , причем ее среднее значение для лунных материков равно 2.55 г/см^3 (Wieczorek и др., 2013).

ЧИСЛО ЛУННЫХ КРАТЕРОВ С ДИАМЕТРАМИ, БОЛЬШИМИ 15 КМ

Нами было проанализировано число лунных кратеров с диаметром, большим 15 км, и с возрастом менее 1.1 млрд лет (т.е. относящихся к коперниковскому периоду геологической истории Луны) на всей поверхности Луны, а также в области Океана Бурь, Моря Дождей, Моря Спокойствия и других морей видимой стороны Луны. Океан Бурь (Oceanus Procellarum) и другие моря видимой стороны Луны представляют собой равнины и ударные бассейны, заполненные застывшей базальтовой лавой. Отношение r_{reg} площади рассматриваемой области к площади полной поверхности Луны составляет 0.155. Это – уточненная оценка. Ранее в (Ipatov и др., 2018; 2020) нами использовалось отношение, равное 0.176.

Ниже мы используем в первую очередь данные из работы (Mazrouei и др., 2019a). В этой работе оценки возраста кратеров основывались на использовании данных радиометра Diviner зонда LRO, которые позволили получить информацию о теплофизическом составе поверхности Луны в области исследуемых кратеров. В отличие от более ранних исследований, в работе (Mazrouei и др., 2019a) применялись данные, полученные радиометром вплоть до 2012 г.

Каталог лунных кратеров (Losiak и др., 2015) включает в себя информацию о возрасте кратеров на основе работ (Wilhelms, 1987; Wilhelms, Byrne, 2009), использовавшими “традиционные” методы определения возраста кратеров. Как было показано выше при анализе рис. 1, каталог кратеров (Losiak и др., 2015) содержит неполную информацию о кратерах с диаметром $D < 30$ км. Однако при обсуждении ряда вопросов мы рассматривали также данные этой работы. Это рассмотрение было вызвано, в частности, следующими причинами. Данные (Losiak и др., 2015) показывают минимальную оценку числа кратеров с диаметром $D < 30$ км, которая даже для $15 \leq D \leq 30$ км оказывается выше, чем данные (Mazrouei и др., 2019a) с “правильным” наклоном кривой Нойкума, что вместе с данными (Werner, Ivanov, 2015) и приведен-

ными ниже нашими оценками числа кратеров позволяет предположить, что кривая (Losiak и др., 2015) на рис. 1 должна быть выше при $D < 30$ км. Мы сравнили число кратеров на единице площади для всей поверхности Луны и для области морей не только для данных работы (Mazrouei и др., 2019a), но и для (Losiak и др., 2015), и выяснили, что отличия в числе кратеров на единице площади для морей и для материков есть в обеих работах. Данные (Losiak и др., 2015) используются также ниже при сравнении отношения глубины кратера к его диаметру для морей и для материков, а также при сравнении числа кратеров, в частности, с диаметрами, большими 30 км, с данными (Mazrouei и др., 2019a).

Таблицы 1 и 2 включают информацию из работ (Mazrouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2015) о названиях, координатах (широта и долгота), диаметрах и глубинах кратеров, возраст которых не превышает 1.1 млрд лет. Представлены также значения отношения глубины кратера к его диаметру. Для некоторых кратеров в табл. 1 и для всех кратеров в табл. 2 приведены оценки их возраста (в млрд лет). Приведенные в табл. 1 и 2 данные используются нами при изучении изменений числа околоземных объектов со временем для оценок числа кратеров с диаметром, не меньшим 15 или 18 км (при этих оценках значение диаметра в таблице округлялось до целого числа), а также при изучении зависимости отношения диаметра кратера к его глубине от диаметра кратера и зависимости числа кратеров от диаметра. Оценки числа кратеров с диаметром $D > 18$ км используются ниже при анализе данных табл. 3 и рассмотрении отличий в числе кратеров с $15 < D < 18$ км, полученных в (Mazrouei и др., 2019a) и в (Losiak и др., 2015).

Согласно данным из работы (Losiak и др., 2015), 53 кратера с диаметром, не меньшим 15 км, относятся к коперниковскому периоду, причем в области морей видимой стороны Луны расположены 29 из них (табл. 1). По данным из работы (Mazrouei и др., 2019a), число таких кратеров равно 44 и 12, соответственно (табл. 2).

По данным табл. 1, основанным на данных работ (Wilhelms, 1987; Wilhelms, Byrne, 2009), для Океана Бурь и других морей видимой стороны Луны, (площадь которых составляет 0.155 от поверхности Луны) число кратеров с диаметром, не меньшим 18 км, равно 27, а число кратеров с диаметром, не меньшим 15 км, равно 29. По данным табл. 2 (полученной на основе данных таблицы S1 из приложения к (Mazrouei и др., 2019a)) для Океана Бурь и других морей видимой стороны Луны число кратеров с диаметрами не меньшими 13, 17 и 18 км, равно 11, 12 и 16, соответственно. То есть в табл. 2 содержится всего один кратер для интер-

Таблица 2. Размеры, координаты и возраст кратеров коперниковского периода, расположенных в районе Океана Бури и морей видимой стороны Луны, по данным (Mazrouei и др., 2019a)

№	Имя	Широта, град	Долгота, град	Диаметр, км	Глубина, км	Отношение глубины кратера к диаметру	Возраст, млрд лет
1	Коперник	10	-20	97	3	0.031	0.797
2	Глушко	8	-78	43	2.2	0.051	0.196
3	Аристарх	24	-47	40	3.2	0.080	0.164
4	Петавий В	-27	57	34	3	0.088	0.224
5	Фалес	-20	50	32	2.5	0.078	0.061
6	Кеплер	8	-38	32	2.7	0.084	0.93
7	Прокл	16	47	28	4	0.143	0.253
8	Лаланд	-4	-9	24	2.9	0.121	0.495
9	Швабе F	66	50	21	2.8	0.133	0.814
10	Дионисий	3	17	19	3	0.158	0.492
11	Дауэс	17	26	18	2.2	0.122	0.454
12	Каррель	11	27	17	2.2	0.129	0.295
13	Сирсалис F	-14	300	13	2.5	0.192	0.629
14	Дарне С	-14	334	13	2.5	0.192	0.582
15	Эгеле А	52	11	13	2.6	0.20	0.084
16	Местинг А	-3	335	13	2.9	0.223	0.113
17	Гамбар А	1	341	12	2.6	0.217	0.344
18	Камерон	6	46	11	2.2	0.20	0.48
19	Аль Фергани С	-6	18	11	2.5	0.227	0.433
20	Мессье А	-2	47	11	2.4	0.218	0.128
21	Арат	24	5	11	1.9	0.173	0.421
22	Эвклид С	-13	330	11	2	0.182	0.137
23	Арнольд G	67	31	10	2.2	0.22	0.223
24	Бессарион	15	323	10	2.1	0.21	0.164
25	Демокрит А	62	32	10	2	0.20	0.218

Таблица 3. Число $N_{\text{reg}15}$, $N_{\text{reg}18}$ и $N_{\text{reg}30}$ кратеров с возрастом не более 1.1 млрд лет и с диаметрами, не меньшими 15, 18 и 30 км, соответственно. Эти числа получены для морей видимой стороны Луны, для всей поверхности Луны и для “материков” (для всей поверхности Луны минус площадь морей видимой стороны Луны) на основе данных работ (Mazrouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2015). Отношение r_{reg} площади рассматриваемой области к площади поверхности Луны составляет 0.155 для морей видимой стороны Луны, 1.0 для всех кратеров и 0.845 для “материков”

	Моря видимой стороны (Mazrouei и др., 2019a)	Материки (Mazrouei и др., 2019a)	Вся Луна (Mazrouei и др., 2019a)	Моря видимой стороны (Losiak и др., 2015)	Материки (Losiak и др., 2015)	Вся Луна (Losiak и др., 2015)
r_{reg}	0.155	0.845	1.0	0.155	0.845	1.0
$N_{\text{reg}15}$	12	32	44	29	24	53
$N_{\text{reg}18}$	11	20	31	27	22	49
$N_{\text{reg}30}$	6	8	14	17		35
$N_{\text{reg}15}/r_{\text{reg}}$	77	38 (77/38 \approx 2.0)	44 (77/44 \approx 1.75)	187	28 (187/28 \approx 6.8)	53 (187/53 \approx 3.5)
$N_{\text{reg}18}/r_{\text{reg}}$	71	24 (71/24 \approx 2.96)	31 (71/31 \approx 2.3)	174	26 (174/26 \approx 6.7)	49 (174/49 \approx 3.55)
$N_{\text{reg}30}/r_{\text{reg}}$	39	9.5 (39/9.5 \approx 4.1)	14 (39/14 \approx 2.8)	110	18 (110/18 \approx 6.1)	35 (110/35 \approx 3.14)

вала $13 < D < 17$ км и 4 кратера для гораздо более узкого интервала $17 < D < 18$ км.

Отношение глубины кратера к его диаметру, приведенное в табл. 1 и 2, в основном больше для меньших значений диаметра кратера. Однако даже для примерно одинаковых диаметров глубины могут отличаться в два раза (сравните, например, строки 17–19 в табл. 1 для кратеров на материках и строки 13–14 в этой таблице для кратеров на морях).

В табл. 3 приведены значения N_{reg15} , N_{reg18} и N_{reg30} числа кратеров с возрастом не более 1.1 млрд лет и с диаметрами, не меньшими 15, 18 и 30 км, соответственно. Эти числа получены для морей видимой стороны Луны и для всей поверхности Луны, на основе данных работ (Mazrouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2015). Отношение r_{reg} площади рассматриваемой области к площади Луны составляет 0.155 для морей видимой стороны Луны и 0.985 для всех кратеров, рассматриваемых в (Mazrouei и др., 2019a). В (Mazrouei и др., 2019a) рассматривалась область между 80° N и 80° S . Отличие между 0.985 и 1.0 практически не влияет на данные табл. 3, и в табл. 3 вместо $r_{\text{reg}} = 0.985$ мы приводим данные для $r_{\text{reg}} = 1$. В табл. 3 приведены также отношения $N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$, $N_{\text{reg18}}/r_{\text{reg}}$ и $N_{\text{reg30}}/r_{\text{reg}}$, которые являются оценками числа кратеров на всей поверхности Луны при условии, что число кратеров на единице площади такое же, как и в рассматриваемой области морей.

Число кратеров с диаметром в диапазоне от 15 до 18 км равно 4 в (Losiak и др., 2015) и 13 (отличие более чем в 3 раза) в (Mazrouei и др., 2019a) для всей поверхности Луны и равно 2 и 1 для морей. Это отличие очередной раз характеризует отмеченную во введении при анализе рис. 1 неполноту данных для кратеров с $D < 30$ км в (Losiak и др., 2015).

Представленные в табл. 3 значения $N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$, $N_{\text{reg18}}/r_{\text{reg}}$ и $N_{\text{reg30}}/r_{\text{reg}}$, полученные при экстраполяции, основанной на данных для района Океана Бурь (Ocean Procellarum) и других морей видимой стороны Луны, больше в k_{OP} ($k_{\text{OP}} > 1.7$) раз, чем для кратеров на всей или почти всей поверхности Луны. При рассмотрении $N_{\text{reg15}}/r_{\text{reg}}$ значения k_{OP} равнялись 1.75 и 3.53 для данных из работ (Mazrouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2015), соответственно. При рассмотрении $N_{\text{reg18}}/r_{\text{reg}}$ аналогичные значения k_{OP} равнялись 2.29 и 3.55, а для $N_{\text{reg30}}/r_{\text{reg}}$ равнялись 2.79 и 3.14. Таким образом, число кратеров с диаметром $D > 15$ км, а также число кратеров с диаметром $D > 30$ км, образование которых может быть отнесено к коперниковскому периоду, на единице площади в областях морей видимой стороны Луны больше, чем на всей поверхности Луны. При этом отношение k_{OP} числа кратеров на единице площади для морей и для всей поверхности Луны при $D \geq 15$ км было в

$3.53/1.75 = 2.35$ раза больше, а при $D \geq 30$ км было в $3.14/2.79 \approx 1.13$ раза больше в (Losiak и др., 2015), чем в (Mazrouei и др., 2019a). То есть при $D \geq 30$ км значения k_{OP} мало отличались для этих работ, но число таких кратеров в (Mazrouei и др., 2019a) было в $35/14 \approx 2.5$ раза меньше, чем в (Losiak и др., 2015). Возможно, данные (Mazrouei и др., 2019a) занижают данные о числе коперниканских кратеров на всем диапазоне диаметров. Отношение числа кратеров на единице поверхности для материков и для океанов еще больше, чем такое же отношение k_{OP} для всей поверхности Луны и для океанов. Для кратеров с диаметрами, большими 15 км и большими 30 км, отношение числа кратеров на единице площади для морей было больше, чем для материков, в 7 и 6 раз для данных (Losiak и др., 2015) и в 2 и 4 раза для данных Mazrouei и др., (2019a).

ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЙ ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, С ЛУНОЙ

Количество обнаруженных объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ), т.е. объектов с перигелийным расстоянием, меньшим 1.3 а. е., с диаметром $d > 1$ км составило 900 по данным от 26 октября 2019 г. (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/size.html>), а общее число N_1 таких ОСЗ оценивается примерно равным 920. Эта оценка числа ОСЗ на сайте на самом деле относится к числу ОСЗ с абсолютной звездной величиной H меньшей 17.75. Диаметры ОСЗ с $H = 17.75$ равны 1 км при альбедо, равном 0.14. В действительности альбедо различных ОСЗ могут быть различными, и число ОСЗ с диаметром, большим 1 км, может несколько отличаться от числа ОСЗ с $H \leq 17.75$. Granvik и др. (2018) оценивали число ОСЗ с $H \leq 17.75$, равным 962_{-56}^{+52} . По их оценкам 58% из 962 ОСЗ пересекают орбиту Земли. Астероиды главного пояса S-класса имеют среднее альбедо, равное 0.208 ± 0.079 , а астероиды класса C — 0.071 ± 0.040 (Usui и др., 2013). Здесь указаны возможные пределы изменения альбедо. Отличаются также плотности астероидов. Согласно (Carr, 2012) для астероидов S-класса плотность равна 2.66 ± 1.29 , а для C-класса — 1.57 ± 1.38 г/см³. Диаметры астероидов со звездной величиной $H = 17.75$ равны 0.82 и 1.4 км для S- и C-классов соответственно при средних значениях их альбедо. Если принять значение плотности мишени равной плотности астероидов S-класса (это допустимо, так как плотности астероидов S-класса близки к плотности лунной коры), то астероиды со звездной величиной $H = 17.75$ класса S в среднем производят кратеры (при скорости ударов 19 км/с) с диаметром $D = 12.5$ км, а астероиды класса C — с диаметром $D = 15.7$ км. Поскольку астероиды класса C составляют большинство (~75%), то статистически количество астероидов

с $H \leq 17.75$ должно неплохо соответствовать количеству кратеров диаметром более 15 км. За счет астероидов класса S это количество кратеров с диаметром более 15 км может быть несколько меньше. Единичные дробления крупных астероидов должны приводить к увеличению количества кратеров независимо от того, какое альbedo у фрагментов. Однако изменения со временем вклада различных источников в ОСЗ могут немного менять характерную зависимость диаметра кратера от диаметра ударника.

Ipatov и Mather (2004a, 2004b) оценили отношение $k_{\text{ЕСО}}$ числа объектов, сближающихся с Землей, (ОСЗ) к количеству объектов, пересекающих орбиту Земли, (ОПОЗ, ЕСОs) примерно равным $1300/756 \approx 1.72$. Аналогичное соотношение ($6718/3906 \approx 1.72$) было вычислено для объектов, обнаруженных до 1 июня 2010 г. (Астероидно-кометная опасность, 2010). Для большего числа ОСЗ по данным NASA (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>) на август 2019 г. это соотношение было примерно таким же (1.74). Обратная величина отношения 0.58 числа ОПОЗ к числу ОСЗ, рассматриваемого в (Granvik и др., 2018), равна 1.72 и совпадает с рассматриваемым нами отношением числа ОСЗ к числу ОПОЗ.

Во многих публикациях (например, Werner, Ivanov, 2015; Емельяненко, Нароенков, 2015; Granvik и др., 2018) вероятность столкновения ОПОЗ с Землей считалась близкой к $(3-4) \times 10^{-9}$. Согласно (Morbidelli и др., 2020), вероятность столкновения ОСЗ с Землей за год равна 1.33×10^{-9} . При $k_{\text{ЕСО}} = 1.72$ для ОПОЗ эта вероятность соответствует $p_{\text{Е}} \approx 2.3 \times 10^{-9}$. Эти оценки $p_{\text{Е}}$ в 2–5 раз меньше оценок, сделанных на основе рассмотрения орбит наблюдаемых крупных ОПОЗ Bottke и др. (1994) и Dvorak и Pilat-Lohinger (1999), использовавшими алгоритмы, близкие к алгоритму из (Wetherill, 1967), и Ипатовым (Ипатов, 2000; Ipatov, 2001; Ipatov, Mather, 2004a, 2004b), применявшим совсем другой алгоритм вычисления вероятностей столкновений тел с планетами. Вероятность $p_{\text{Е}}$ столкновения ОПОЗ с Землей за один год равна $1/T_{\text{Е}}$, где $T_{\text{Е}}$ – характерное время от текущего момента времени до столкновения ОПОЗ с Землей. Число известных ОПОЗ уже в 2001 г. (в частности, рассмотренных в (Ipatov, Mather, 2004a, 2004b)) превышало современное число ОПОЗ с диаметром не менее 1 км, причем рассмотрение большего числа ОПОЗ только немного уменьшало $T_{\text{Е}}$. В (Bottke и др., 1994; Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999; Ипатов, 2000; Ipatov, 2001; Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) вычислялись вероятности $p_{\text{Е}}$ столкновений с Землей наблюдаемых ОПОЗ (при известных значениях больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит этих ОПОЗ), а затем определялось среднее значение

этой вероятности за один год, равное $1/T_{\text{Е}}$. Значение $p_{\text{Е}}$ в этих работах было близко к 10^{-8} .

В конце настоящего раздела, в частности, на основании расчетов Емельяненко и Нароенкова (2015) для вероятностей столкновений околоземных объектов различных размеров с Землей обсуждается, что противоречия между различными оценками $p_{\text{Е}}$, отличающимися в несколько раз, может и не быть. Эти оценки вероятностей могут относиться к различным интервалам времени. Оценки (Werner, Ivanov, 2015; Емельяненко, Нароенков, 2015; Granvik и др., 2018) соответствуют вероятностям выпадения 1 км тел на Землю в ближайшее время. Например, в (Емельяненко, Нароенков, 2015) рассматривается время ± 300 лет. Эти оценки были сделаны в рамках изучения проблемы астероидной опасности в настоящее время. В нашей работе анализируются кратеры, образовавшиеся в течение 1 млрд лет. При рассмотрении вероятностей столкновений 1 км тел с Землей в течение миллионов лет их распределение по элементам орбит может включать такие элементы орбит, при которых вероятности столкновений с Землей больше, чем для орбит ОСЗ в настоящее время. Например, по данным работы (Емельяненко, Нароенков, 2015), рассматривавшей движение ОСЗ на интервале ± 300 лет, эффект гравитационной фокусировки при движении ОСЗ в некоторой сфере вокруг Земли для объектов с абсолютной яркостью $H < 27$ был в 1.85 раза больше, чем для объектов с абсолютной яркостью $H < 18$, из-за возможности сближений с меньшими скоростями (при одинаковых динамических характеристиках для разных H). Как подробнее обсуждается ниже в конце раздела, для объектов с абсолютной яркостью $H < 27$ на основании данных этой работы можно оценить $T_{\text{Е}} \approx 150$ млн лет (что соответствует $p_{\text{Е}} \approx 6.7 \times 10^{-9}$). По нашему мнению, хотя число 1 км околоземных объектов и их типичные элементы орбит в течение миллионов лет могли быть примерно такими, как в настоящее время, за эти миллионы лет элементы орбит отдельных околоземных объектов могли принимать такие значения, при которых вероятности столкновений объектов с Землей и Луной могут быть больше, чем вероятности, основанные на современных орбитах 1 км ОСЗ. В последнем разделе нашей статьи мы обсуждаем, как можно трактовать данные о возрасте коперниканских кратеров для различных значений вероятностей столкновений ОПОЗ с Землей и Луной за большие интервалы времени (не меньшие миллионов лет).

На рис. 26 из работы (Granvik и др., 2018) вероятность выпадения на Землю астероидов ярче 18-й звездной величины (т.е. в среднем с диаметром не менее 1 км) составляет около 2×10^{-6} , т.е. с учетом числа ОПОЗ вероятность столкновения одного

ОПОЗ с Землей составляет около 4×10^{-9} . Оценки вероятности столкновений ОПОЗ с Землей (Granvik и др., 2018) делались не для орбит наблюдаемых ОПОЗ, а для астероидов, приходящих к орбите Земли из семи различных источников, но согласовывались с наблюдаемым распределением орбит околоземных объектов. На рис. 26 из работы (Granvik и др., 2018) приведена кривая зависимости числа столкновений за год с Землей тел с абсолютной яркостью, меньшей H , от H . При H около 25–26 абсолютных звездных величин, точки на этой кривой соответствуют значениям вероятности, в несколько раз (почти на порядок) меньшим приведенных на этом же рисунке значений вероятности выпадения на Землю объекта типа Тунгусского объекта, а также вероятностей выпадения болидов, взятых из (Brown и др., 2013). На рис. 26 из работы (Granvik и др., 2018) экстраполяция кривой вероятности столкновения с Землей объектов с $17 \leq H \leq 25$ до данных о наблюдаемых болидах с $H \geq 26$ согласуется с данными (Brown и др., 2002), но не согласуется с данными более поздней работы (Brown и др., 2013). Для согласования с данными (Brown и др., 2013) и с вероятностями выпадения на Землю объектов типа Тунгусского явления, кривая вероятности столкновения с Землей при $17 \leq H \leq 25$ должна лежать гораздо выше кривой, приведенной на рис. 26 работы (Granvik и др., 2018), и такая более высокая кривая лучше согласуется с используемой нами вероятностью p_E столкновения одного ОПОЗ с Землей за год близкой к 10^{-8} (т.е. вероятность выпадения на Землю объекта с $H = 18$ близка к 5×10^{-6} , так как число таких ОПОЗ порядка 500). В (Harris, D’Abramo, 2015) характерное время между выпадениями на Землю объекта типа Тунгусского явления считается равным примерно 500 годам (такое реальное событие произошло всего около 100 лет назад), а по данным кривой на рис. 26 работы (Granvik и др., 2018) такое характерное время превышает 1000 лет.

Если поднять вверх кривую, приведенную на рис. 26 работы (Granvik и др., 2018), в соответствии с полученной в (Bottke и др., 1994; Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999; Ипатов, 2000; Ipatov, 2001; Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) вероятностью p_E столкновения ОПОЗ с диаметром не менее 1 км с Землей за год, близкой к 10^{-8} (т.е. рассматривать характерное время T_E до столкновения ОПОЗ с Землей, равное примерно 100 млн лет), то полученная кривая будет гораздо лучше согласовываться с современными данными о вероятностях выпадений болидов, взятыми из (Brown и др., 2013), и с ожидаемой частотой выпадений на Землю объектов типа Тунгусского явления, чем кривая на цитируемом рисунке.

Из-за столкновений с другими небесными телами и выброса на гиперболические орбиты ди-

намическое время жизни ОПОЗ меньше T_E . Значение T_E используется ниже для учета вероятности столкновения и характеризует характерное время до столкновения ОПОЗ с Землей для модели, в которой ОПОЗ остаются все время на своих орбитах, никуда не уходят и ни с чем кроме Земли не сталкиваются.

В (Ипатов, 1995; 2000; Ipatov, 2001; Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) при вычислении T_E рассматривались все ОПОЗ, известные на момент вычисления. В (Ипатов, 1995) для 93 объектов, пересекающих орбиту Земли, и известных в 1991 г., было получено $T_E = 76$ млн лет. Значение T_E было получено равным 134 млн лет для ОПОЗ в (Bottke и др., 1994), равным 100 млн лет для 417 ОПОЗ в (Ипатов, 2000), равным 120 млн лет для 54 астероидов группы Аполлона в (Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999) и равным 105 млн лет для 363 объектов Аполлона в (Ипатов, 2000; Ipatov, 2001). Другие цитируемые выше авторы, в отличие от Ипатова, при оценках T_E использовали в основном алгоритмы, близкие к алгоритму, рассмотренному в (Wetherill, 1967), который представляет собой развитие идей Эпика (Öpik, 1951).

В (Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) значения T_E были получены равными 15, 164 и 67 млн лет для 110 астероидов группы Атона, 643 астероидов группы Аполлона и всех ОПОЗ, соответственно. Астероидами группы Амура называют астероиды с перигелийными расстояниями большими 1.017 а. е. Поэтому практически все такие астероиды (пока они не изменят свои перигелийные расстояния) не могут сблизиться с Землей до расстояния сферы действия Земли. Изменения больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит астероидов со временем в этих расчетах не рассматривались. Хотя аполлонцы в этих расчетах составляли 85% всех ОПОЗ, значения T_E для них были в 2.4 раза больше, чем для всех ОПОЗ. При $T_E = 67$ млн лет вероятность $p_E = 1/T_E$ столкновения ОПОЗ с Землей за 1 год равна 1.5×10^{-8} . Различия в значениях T_E для разных публикаций были вызваны как отличиями в используемых алгоритмах, так и разным числом рассмотренных астероидов.

Меньшие, чем в (Ипатов, 2000), значения T_E для всех ОПОЗ в (Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) были обусловлены несколькими атонцами с небольшими наклонами орбит, обнаруженными в начале 2000-х гг. При увеличении наклона орбиты атонца 2000 SG344 от его нынешнего значения, равного 0.1° , до 1° , значения T_E в (Ipatov, Mather, 2004a) были получены равными 28 и 97 млн лет для атонцев и всех ОПОЗ, соответственно. Эти большие, чем при рассмотрении атонца 2000 SG344 с его нынешним наклоном орбиты, времена T_E иллюстрируют важность уче-

та небольшого числа астероидов с высокой вероятностью их столкновений с Землей (роль малых наклонений обсуждается также ниже в следующем параграфе). Ипатов (1995; 2000) отмечал, что при использовании одних и тех же формул, значения T_E , вычисленное для всех ОПОЗ, в несколько раз меньше, чем для средних значений наклонений и эксцентриситетов для этих же ОПОЗ. Исследования эволюции орбит объектов, первоначально пересекавших орбиту Юпитера, и резонансных астероидов показали (Ipatov, Mather, 2003; 2004a, 2004b; 2007), что вероятность столкновения одного такого объекта с Землей может быть больше, чем для тысяч других объектов, первоначально имевших близкие орбиты.

В (Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) расчеты T_E проводились для элементов современных орбит ОПОЗ. Однако аналогичные значения $T_E = 67$ млн лет могли быть и для интервала в 1 млрд лет, так как некоторые ОПОЗ с довольно большой вероятностью раньше также могли иметь аналогичные небольшие наклонения. Наклонения орбит ОПОЗ меняются со временем. В (Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) рассматривалось 110 атонцев. Если наклонения орбит случайным образом распределены в диапазоне от 0° до 11° , то одно из них будет меньше 0.1° (в предыдущем параграфе мы обсуждали вклад в T_E атонца 2000 SG344 с наклонением орбиты, равным 0.1°). Если наклонения случайным образом распределены в диапазоне от 0° до 22° , то одно из них будет иметь значение в диапазоне от 0° до 0.2° , т.е. в среднем будет равно 0.1° .

При вычислениях вероятностей p_{dts} сближений двух небесных объектов (например, ОПОЗ с Землей) до радиуса r_s рассматриваемой сферы (обычно сферы действия планеты массы m_{pl} и радиуса $r_s \approx R(m_{\text{pl}}/M_S)^{2/5}$, где M_S – масса Солнца) за время d_t в пространственной модели Ипатовым использовались следующие формулы (Ипатов, 1988b; 2000 [§2 главы 4]): $p_{\text{dts}} = d_t/T_3$, $T_3 = 2\pi^2 k_p T_s k_v \Delta i R^2 / (r_s^2 k_{fi})$ – характерное время до сближения, Δi – угол в радианах между плоскостями орбит сближающихся небесных объектов, R – расстояние от места сближения небесных объектов до Солнца, k_{fi} – сумма углов (в радианах) с вершиной в Солнце, внутри которых расстояние между проекциями орбит (по лучу с вершиной в Солнце) меньше r_s (эта сумма различная для различных орбит, см. рис. 4.1 в (Ипатов, 2000)), T_s – синодический период обращения, $k_p = P_2/P_1$, $P_2 > P_1$, P_i – период обращения i -го объекта вокруг Солнца, $k_v = (2a/R - 1)^{1/2}$, a – большая полуось орбиты объекта. Коэффициент k_v был добавлен в (Ipatov, Mather, 2004a, 2004b) для учета зависимости скорости сближения от положения объекта на эксцентричной орбите. Вероятность столкновения объектов, вошедших в

сферу действия, полагалась равной $p_{\text{dts}} = (r_s/r_s)^2(1 + (v_{\text{par}}/v_{\text{rel}})^2)$, где $v_{\text{par}} = (2Gm_\Sigma/r_\Sigma)^{1/2}$ – параболическая скорость, v_{rel} – относительная скорость объектов, сближившихся на расстояние r_s , r_Σ – сумма радиусов сталкивающихся объектов суммарной массы m_Σ , G – гравитационная постоянная. При малых значениях Δi в алгоритме использовались другие формулы. Алгоритмы (и их обоснование) вычисления k_{fi} и характерного времени между столкновениями объектов приведены С.И. Ипатовым в приложении 3 (стр. 86–130) отчета Института прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР № О-1211 за 1985 г. Вероятность p_{dt} столкновения ОПОЗ и Земли за время d_t равна $p_{\text{dts}} \cdot p_{\text{dts}}$. Значения $p_{\text{dts}} = d_t/T_3$ и T_3 вычислялись для фиксированных значений больших полуосей, эксцентриситетов и наклонений орбит рассматриваемых небесных объектов, но для различных возможных ориентаций их орбит. При вычислениях $p_E = 1/T_E$ бралось среднее значение p_{dt} по всем рассматриваемым ОПОЗ.

Алгоритмы вычисления вероятности столкновений тел с планетами использовались Ипатовым (2000; 2019) при изучении процесса аккумуляции планет. Эти алгоритмы, ориентированы на рассмотрение вероятностей столкновений большого числа планетезималей в течение больших интервалов времени. В эти алгоритмы было заложено осреднение по различным ориентациям орбит (при фиксированных значениях больших полуосей, эксцентриситетов и наклонений орбит). Полученные оценки времен роста планет хорошо согласуются с данными работ различных авторов. Например, полученный в (Ипатов, 2019) на основе вычисления таких вероятностей столкновений вывод о формировании половины масс Земли и Венеры за время не более 5 млн лет независимо сделан в (Lammer и др., 2019) на основе изучения изотопного состава благородных газов в атмосферах этих планет. Наши оценки $p_E = 1/T_E$ согласуются с многочисленными моделями аккумуляции Земли. В большинстве расчетов аккумуляции Земли из планетезималей (как для аналитических оценок, так и при численном интегрировании уравнений движения или при учете гравитационных взаимодействий методом сфер), сделанных различными авторами (см. ссылки в (Ипатов 2000; 2019)), практически все окружающие тела выпадали на Землю за время, не превышавшее 100 млн лет. Такое время (100 млн лет) практически полной аккумуляции Земли считается общепринятым последние 60 лет. Результаты моделирования эволюции дисков гравитирующих тел, объединяющихся при столкновениях, показали (Ипатов, 1993), что на конечных стадиях аккумуляции Земли средние эксцентриситеты орбит планетезималей могли превышать 0.4, т.е. могли быть сравнимыми с эксцентриситетами орбит со-

временных ОПОЗ. В (Ипатов, 2019) на основании скоростей столкновений планетезималей с почти сформировавшейся Землей был сделан вывод о том, что эксцентриситеты орбит планетезималей, столкнувшихся с Землей, в основном превышали 0.3. Поэтому трудно предположить, что значения T_E для планетезималей, выпадавших на почти сформировавшуюся Землю, были значительно меньше, чем для современных ОПОЗ.

Учитывая, наряду с приведенными выше рассуждениями, также проведенное ниже сравнение вероятностей столкновений астероидов с планетами земной группы, полученных при использовании алгоритма из (Wetherill, 1967), использовавшегося в (Bottke и др., 1994; Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999), и путем численного интегрирования уравнений движения, мы считаем, что в настоящей работе для оценок вероятности столкновения ОПОЗ с диаметром, не меньшим 1 км, с Землей за год мы можем, наряду с p_E , близким к $(3-4) \times 10^{-9}$, в качестве одного из возможных значений p_E использовать значение, близкое к 10^{-8} (т.е. рассматривать характерное время T_E до столкновения, равное примерно 100 млн лет).

Во многих работах при вычислении вероятности столкновений тел с планетой использовался подход, основанный на идеях Эпика, в частности, модификация уравнения Эпика, сделанная в (Wetherill, 1967). Эта модификация уравнения с некоторыми изменениями рассматривалась в последующих работах ряда авторов. В (Dones и др., 1999) проводилось сравнение вероятностей столкновений мигрировавших тел с планетами для расчетов с помощью алгоритма, основанного на алгоритме, использовавшимся в (Wetherill, 1967), с результатами расчетов путем численного интегрирования. В частности, на рис. 6 из их работы вероятности столкновений тел, выброшенных с Луны, с Венерой и тел, выброшенных с Марса, с Землей немного больше, при численном интегрировании, чем при расчетах с помощью метода Эпика. В (Vokrouhlický и др., 2012) и (Pokorný, Vokrouhlický, 2013) рассматривалась модификация алгоритма (Wetherill, 1967), учитывающая изменения аргумента перигелия астероида из-за влияния Юпитера и других планет. Отметим, что в рассматриваемом нами алгоритме тоже бралось среднее значение по различным значениям аргумента перигелия. (Pokorný, Vokrouhlický, 2013) провели сравнение числа столкновений тел с планетами земной группы в случае расчетов тремя методами: путем численного интегрирования уравнений движения, с помощью алгоритма (Wetherill, 1967) и с помощью упоминавшейся выше модификации этого алгоритма. На основе данных табл. 1 из работы (Pokorný, Vokrouhlický, 2013), в нашей табл. 4 мы приводим отношения числа столкновений астероидов из е-пояса (e-belt, астероиды с

Таблица 4. Отношения числа N_{Weth} столкновений астероидов из е-пояса с планетами для расчетов с помощью алгоритма из (Wetherill, 1967) и числа N_{PV} столкновений тел с планетами для расчетов с помощью модификации этого алгоритма к аналогичному числу N_{direct} столкновений, полученному при численном интегрировании (по данным работы (Pokorný, Vokrouhlický, 2013))

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс
$N_{\text{Weth}}/N_{\text{direct}}$	0.68	1.00	1.08	0.67
$N_{\text{PV}}/N_{\text{direct}}$	0.91	1.00	1.06	1.08

большими полуосями орбит в диапазоне от 1.7 до 2.1 а. е.) с планетами для расчетов с помощью алгоритма из (Wetherill, 1967) и с помощью модификации этого алгоритма к числу столкновений, полученному при численном интегрировании. Данные табл. 4 показывают, что модифицированный алгоритм дает немного более точные значения вероятности столкновений, чем алгоритм из (Wetherill, 1967). Для Земли алгоритм из (Wetherill, 1967) завысил на 8% вероятность столкновения, а для Меркурия и Марса – занижил вероятность столкновения примерно в 1.5 раза. Большие отличия для Меркурия и Марса, возможно, связаны с большими эксцентриситетами и наклонениями орбит этих планет, для которых метод Эпика хуже работает. Результаты работ (Dones и др., 1999) и (Pokorný, Vokrouhlický, 2013) позволяют предположить, что полученные в (Bottke и др., 1994; Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999) с помощью алгоритма, аналогичного алгоритму, рассмотренному в (Wetherill, 1967), оценки характерного времени столкновения ОПОЗ с Землей, близкие к 100 млн лет, (т.е. оценки вероятности столкновения одного ОПОЗ с Землей за год, близкие к 10^{-8}) вряд ли будут отличаться от оценок, полученных путем численного интегрирования, больше, чем на 1/3. В (Werner, Ivanov, 2015) рассматривалось $T_E \approx 300$ млн лет. Нам не удалось понять, почему (Bottke и др., 1994; Dvorak, Pilat-Lohinger, 1999) и (Werner, Ivanov, 2015), ссылаясь на один и тот же алгоритм (Wetherill, 1967), получили значения T_E , отличающиеся почти в 3 раза. Рассмотрение различного набора ОПОЗ вряд ли могло привести к столь большим различиям.

В отличие от упоминавшихся выше работ, использовавших некоторые формулы при оценках вероятностей столкновений тел с планетами, при оценках вероятностей столкновений ОСЗ с Землей Емельяненко и Нароенков (2015) использовали результаты численного интегрирования эволюции орбит известных ОСЗ на интервале, равном 600 годам. Вычислялось число сближений ОСЗ с Землей до 0.05 а. е. и относительные скорости при таких сближениях. В (Емельяненко, Нароенков, 2015) частота столкновений с Землей

объектов ярче 18 звездной величины H была получена равной 0.53 млн лет. При современной оценке числа 1 км ОСЗ, равной 920, и отношении числа ОСЗ к числу ОПОЗ, равном 1.72, частота, равная 0.53 млн лет, соответствует $T_E = 283$ млн лет. По нашему мнению, результаты расчетов, приведенные в (Емельяненко, Нароенков, 2015), не исключают возможности меньших значений T_E (и больших значений p_E), если рассматривать вероятность столкновений 1 км ОСЗ с Землей на интервалах времени, гораздо больших 600 лет. По нашему мнению, распределение 1 км ОСЗ по их орбитам за миллионы лет могло быть близко к распределению большого числа небольших объектов за сотни лет, и большой вклад в общую вероятность столкновений ОСЗ с Землей (или с Луной) могло вносить небольшое число ОСЗ в те интервалы времени, когда они двигались по орбитам, характеризующимся относительно большими вероятностями столкновений с Землей (или Луной), например, по орбитам, почти лежавшим в плоскости эклиптики.

Для объектов с $H < 27$ в (Емельяненко, Нароенков, 2015) коэффициент учета гравитационной фокусировки из-за гравитационного поля Земли (по сравнению с отсутствием этого учета) был в $240/130 = 1.846$ раза больше, чем для объектов с $H < 18$, из-за возможности сближений ОСЗ с Землей с меньшими скоростями. При такой гравитационной фокусировке для 1 км ОПОЗ вместо 283 млн лет T_E равнялось бы $283/1.846 = 150$ млн лет. Если рассматривать интервал времени, равный не 600 годам, а сотням миллионов лет, то можно допустить, что в распределении по скоростям сближений 1-км ОПОЗ с Землей появятся также небольшие относительные скорости, как и в случае большей статистики сближений меньших ОСЗ с Землей за 600 лет. Хотя отличие в гравитационной фокусировке при рассмотрении больших интервалов времени для 1-км ОСЗ может быть меньше, чем для сравнения с объектами с $H < 27$, так как объекты с $H < 27$ легче открыть в случае медленного движения. При учете гравитационной фокусировки для расстояний от Земли, не превышающих нескольких радиусов Земли, в (Емельяненко, Нароенков, 2015), как и во многих других работах, использовалась формула для гиперболического движения тел около Земли. При небольших относительных скоростях относительное движение может происходить не по гиперболе, а по сложной траектории, и тело может даже совершать несколько оборотов вокруг планеты. Не исключено, что вероятность столкновения при небольших относительных скоростях может быть больше, чем при представлении траектории этого относительного движения гиперболой. Большая статистика столкновений может существенно уменьшать характерное время T_E до

столкновений тел с планетами. При этом важно увеличение доли сближений ОСЗ с Землей или Луной с небольшими относительными скоростями, а не изменение среднего значения этих скоростей. При одинаковых значениях средних скоростей сближений среднее значение коэффициента учета гравитационной фокусировки может быть больше, если будут меньше минимальные скорости сближений или/и будет больше доля тел с минимальными скоростями сближений. Кроме того, значения T_E могут быть меньше, если будут меньше наклонения гелиоцентрических орбит ОСЗ.

Как отмечалось в работах (Ipatov, Mather, 2003; 2004a, 2004b; 2006; Ipatov, 2019), основной вклад в значение вероятности столкновений тел с Землей за динамические времена жизни тел может вносить небольшая доля рассматриваемых мигрирующих тел, и вклад одного тела в общую вероятность столкновений тел с Землей может быть даже больше, чем сотен или тысяч других тел с близкими начальными орбитами. Например, в (Ipatov, 2019) вероятности p_E столкновений планетезималей из зоны питания Юпитера и Сатурна с Землей за динамические времена жизни планетезималей могли отличаться в десятки раз для различных групп по 250 планетезималей с близкими начальными орбитами. Чем меньше рассматриваемый интервал времени, тем больше может быть относительный вклад в p_E небольшого числа тел. Выше отмечалось, что по данным Емельяненко и Нароенкова (2015) коэффициент гравитационной фокусировки для объектов с $H < 27$ был в 1.846 раза больше, чем с $H < 18$. При этом считалось, что меньшие ОСЗ имеют те же динамические характеристики, что и объекты с $H < 18$. По нашему мнению, гораздо больший (чем увеличение коэффициента гравитационной фокусировки) вклад в возможность увеличения вероятностей столкновений 1-км околоземных объектов с Землей (или Луной) при рассмотрении интервала в миллионы лет по сравнению с оценками вероятности за сотни лет могли внести возможности перехода отдельных ОПОЗ на такие орбиты, при которых вероятность столкновения с Землей (или Луной) была больше, чем суммарная вероятность для сотен других ОПОЗ.

В (Емельяненко, Нароенков, 2015) при расчетах для ОСЗ с $H < 27$ средняя скорость сближения с Землей до 0.05 а. е. была около 8 км/с (при этом отмечалось, что это наблюдаемое значение подвержено значительным эффектам наблюдательной селекции). Для параболической траектории такая средняя скорость соответствует скорости столкновения с Землей около 13.8 км/с. Drolshagen и др. (2020) отмечали, что пик скоростей столкновений с Землей в различных цитируемых ими работах приходился примерно на 13–15 км/с, а скорости метеороидов, входящих в земную атмосферу, мо-

гут меняться от 11 до 73 км/с, и даже наблюдались метеороиды со скоростями 9.8 и 10.9 км/с. Так как параболическая скорость на поверхности Земли равна 11.2 км/с, то это значит, что отдельные метеороиды приближаются к сфере действия Земли с почти нулевой скоростью.

Скорость, равная 13.8 км/с, меньше рассматриваемой нами выше скорости столкновения, равной 19 км/с, соответствующей в наших расчетах 15 км кратерам для 1 км ударников. Для 1 км ударника скорость, равная 13.8 км/с, соответствует диаметру лунного кратера, равному 13 км. В табл. 1 для всей поверхности Луны приведены всего два кратера с диаметром более 12 и менее 15 км. В табл. 2 четыре кратера на морях имеют диаметры между 12 и 17 км. Поэтому число кратеров с диаметрами $D \geq 13$ км не сильно отличается от числа кратеров с $D \geq 15$ км. Средние размеры кратеров зависят не только от средних значений скоростей столкновений, но и от распределения ударников по скоростям.

Отношение p_{EM} вероятностей столкновений ОСЗ с Землей к вероятностям их столкновений с Луной считается равным примерно 22 (Le Feuvre, Wiczorek, 2011). Близкие оценки p_{EM} получены в (Ипатов, 2019).

СРАВНЕНИЕ ЧИСЛА НАБЛЮДАЕМЫХ ЛУННЫХ КРАТЕРОВ С ИХ РАСЧЕТНЫМ ЧИСЛОМ, ПОЛУЧЕННЫМ НА ОСНОВЕ ЧИСЛА ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, И ВЕРОЯТНОСТЕЙ ИХ СТОЛКНОВЕНИЙ С ЛУНОЙ

Оценки числа кратеров на основе данных об объектах, сближающихся с Землей

Число выпадений ОСЗ с диаметром $d > 1$ км на рассматриваемую лунную область в течение времени T можно оценить с помощью формулы

$$N_{est} = N_{lav} r_{reg} T / (T_E p_{EM} k_{ECO}), \quad (6)$$

где N_{lav} – среднее значение числа ОСЗ с диаметром $d > 1$ км за время T , k_{ECO} – доля ОПОЗ среди ОСЗ, p_{EM} – отношение вероятностей столкновений ОПОЗ с Землей и Луной, $p_E = 1/T_E$ – вероятность столкновения ОПОЗ с Землей за 1 год, r_{reg} – отношение площади рассматриваемой области к площади поверхности Луны. Формула (6) получена для модели, в которой число ОПОЗ и вероятности их столкновений с Луной постоянны в течение рассматриваемого интервала времени T . Для $N_{lav} = N_1 = 920$, $k_{ECO} = 1.72$, $T = 1100$ млн лет, $T_E = 100$ млн лет и $p_{EM} = 22$, получаем $N_{est} = N_{est-sea} = 920 \times 0.155 \times 1.1 / (0.1 \times 22 \times 1.72) \approx 41.45$ при $r_{reg} = 0.155$ и $N_{est} = N_{est-ful} \approx 267$ при $r_{reg} = 1$. При таких данных число 1-км ОПОЗ считается равным $920/1.72 = 535$. Аналогично при $T_E \approx 300$ млн лет имеем $N_{est-ful} \approx 89$ и $N_{est-sea} = 14$. $T_E \approx 300$ млн лет со-

ответствует приведенной в (Werner, Ivanov, 2015) вероятности выпадения на Землю за 1 год ОПОЗ с $H < 18$, равной $(3-4) \times 10^{-9}$. Если мы рассмотрим $T_E = 67$ млн лет, то $N_{est-ful} \approx 398.5$ и $N_{est-sea} \approx 61.9$.

Число коперниканских кратеров на морях и материках

Если исходить из данных (Mazrouei и др., 2019) и (Losiak и др., 2015), относящихся ко всей поверхности Луны, то оценки числа N_{obs} кратеров с диаметром, не меньшим 15 км, и с возрастом не более 1.1 млрд лет равняются 44 и 53, т.е. меньше 267 (оценки $N_{est-ful}$ при $T_E = 100$ млн лет) в 6 и 5 раз, соответственно. При $T_E = 300$ млн лет $N_{est-ful}$ превысит N_{obs} примерно в два раза. Отличие между N_{obs} и $N_{est-ful}$ меньше, если рассматривать оценки числа кратеров при предположении, что число кратеров на единице площади такое же, как в области Океана Бурь и других морей видимой стороны Луны. Такие оценки числа кратеров с диаметром не более 15 и 18 км и с возрастом не более 1.1 млрд лет соответствуют значениям N_{reg15}/r_{reg} и N_{reg18}/r_{reg} в табл. 3. Значения N_{reg15}/r_{reg} и N_{reg18}/r_{reg} , полученные на основании анализа кратеров из области Океана Бурь и других морей видимой стороны Луны, рассмотренных в работе (Mazrouei и др., 2019a), не превышают 77. Эти значения меньше 267 (оценки $N_{est-ful}$ при $T_E = 100$ млн лет), 398.5 (при $T_E = 67$ млн лет) и 89 (при $T_E = 300$ млн лет), по крайней мере в 3.5, 5.2 и 1.16 раз соответственно. По данным (Losiak и др., 2015) 53 лунных кратера с диаметром не менее 15 км относятся к коперниканскому периоду, причем 29 (более половины) из них расположены в области морей видимой стороны Луны. При одинаковом числе кратеров на единице поверхности эти 29 кратеров из области морей соответствуют 187 кратерам для всей поверхности Луны. Даже эта максимальная оценка (187) числа кратеров меньше 267 (оценки $N_{est-ful}$ при $T_E = 100$ млн лет) и 398.5 (при $T_E = 67$ млн лет) в 1.4 и 2.1 раза, соответственно, но больше 89 (при $T_E = 300$ млн лет) в 2.1 раза.

Как отмечалось выше, число коперниканских кратеров на единице площади на морях больше, чем на материках. Возможно, это отличие частично связано с неточностью определения возраста кратеров, особенно вне лунных морей, и общее число коперниканских кратеров на всей поверхности Луны больше, чем по оценкам (Mazrouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2015). Так как отличия в числе кратеров на единице площади на морях и материках получены различными авторами, то какое-то отличие для морей и материков может быть и в действительности. Например, отличия в процессах образования (большой диаметр переходного кратера) и модификации кратеров на морях и материках (большее “уширение” коллапси-

рующих кратеров на морях за 1 млрд лет) могут быть обусловлены отличиями в характеристиках подстилающей поверхности, на которой образуются кратеры. Лунные моря представляют собой низменности с ровным дном, залитые затвердевшей лавой. Моря покрыты вулканическими породами — базальтами.

Различное “уширение” коллапсирующих кратеров на морях и материках может характеризоваться меньшей глубиной кратеров на морях. По формулам из (Kalynn и др., 2013) для $D = 15$ км получаем значения глубины “свежих” кратеров равными 2.26 и 3.1 км для морей и материков соответственно. По данным табл. 1 глубины кратеров с диаметром близким к 15 км и с возрастом до 1.1 млрд лет находятся в диапазоне 2.2–3 км для морей и в диапазоне 2–2.4 км для материков. В табл. 2 диапазоны глубин таких кратеров для морей находятся в диапазоне 2.2–2.5 км. То есть по данным табл. 1 и 2 для диаметров кратеров, близких к 15 км, не видно резкого различия в глубинах коперниканских кратеров для морей и материков. В отличие от (Kalynn и др., 2013) в табл. 1 и 2 приведены данные для коперниканских кратеров. В (Kalynn и др., 2013) среди кратеров с возрастом до 3.2 млрд лет были отобраны 111 кратеров с диаметрами от 15 до 167 км, строение которых удовлетворяло хотя бы одному из четырех критериев, предложенных авторами: (1) ударный расплав на дне кратера и фации выброса, (2) четко выраженный вал кратера, (3) четко выраженные дефекты на стенках кратера и/или (4) лучи в покрытии выброса. Kalynn и др. (2013) полагали, что их критерии позволяют отбирать наиболее “свежие” кратеры.

В настоящей работе на основании наших расчетов мы не анализируем распределение всех лунных кратеров по диаметрам (не анализируем всю кривую Нойкума), а рассматриваем только число коперниканских лунных кратеров с диаметром, большим 15 км. Для других размеров и возрастов кратеров отношение числа наблюдаемых кратеров к оценке числа кратеров, основанной на современном числе ОПОЗ и вероятностях их столкновений с Луной, может отличаться от отношения, рассматриваемого в настоящей работе.

Оценки точности определения числа кратеров для рассматриваемой модели

Основные неточности в определении числа кратеров с помощью формул (5) и (6) связаны с неточностью вычисления вероятности столкновений объектов, сближающихся с Землей, с Луной. Выше отмечается, что одни авторы принимают значение вероятности p_E столкновения одного ОПОЗ с Землей за год близким к $(2-4) \times 10^{-9}$, а другие авторы считают значение p_E близким к

10^{-8} (с отличием от этого значения в ту или иную сторону до 1.5 раз). Соответственно разные авторы рассматривали значения $T_E = 1/p_E$, близкие к 300 млн лет или к 100 млн лет. Большие оценки p_E , по нашему мнению, могут иметь место при рассмотрении больших интервалов времени. Оба этих значения T_E используются ниже при сравнении модельных расчетов с данными о возрастах лунных кратеров. Возможно, что реальные значения T_E и p_E находятся в интервале между приведенными выше значениями. Некоторые приведенные ниже выводы справедливы при обоих значениях T_E . Даже при фиксированном числе околоземных объектов, значения T_E могли меняться со временем вследствие изменения распределения элементов орбит околоземных объектов.

По нашему мнению, остальные неточности, связанные с определением числа кратеров с помощью формул (5) и (6), значительно меньше, чем неопределенности определения T_E . Ошибки в определении используемой нами зависимости диаметра кратера от диаметра ударника, возможно, не превышали 5–10%. В зависимости от альbedo диаметры ОСЗ, имеющие абсолютную звездную величину H , равную 17.75, могут отличаться в несколько раз. Оценки числа современных ОСЗ с диаметром, не меньшим 1 км, были сделаны для среднего альbedo, равного 0.14. В (Астероидно-кометная опасность, 2010, с. 68) отмечается, что минимальные и максимальные значения альbedo для отдельных астероидов могут отличаться от среднего значения примерно в пять раз. При этом предельные значения диаметров могут отличаться от номинального значения, соответствующего среднему значению альbedo, примерно в 2.25 раза.

Для обломков катастрофического разрушения астероида масса тел с $H = 17.75$ в зависимости от класса (S- или C-класса) может меняться в четыре раза, а диаметр кратера по формуле (5) для скорости 20 км/с при $H = 17.75$ составляет от ~15 до ~18 км. При наклоне кривой Нойкума порядка -1.25 при $D \sim 16-18$ км число кратеров будет меняться на ~25%. Число кратеров с диаметрами, большими 15 км и большими 18 км, по данным табл. 3 отличается не более, чем в 1.4 раза. Если учесть разброс плотностей, то разница будет еще больше и может достигать 1.5, если бы все кратеры, образовались при нескольких катастрофических столкновениях только тел определенного класса, так как плотность и размер нескольких “материнских” тел могут отличаться от средних значений. В наших оценках значения N_{est} аналогичный коэффициент неопределенности может быть меньше, так как оценки N_{est} проводились для интервала времени, равного 1.1 млрд лет, в течение которого произошли столкновения достаточно большого числа астероидов, имевших различный

состав. Трудно допустить, что современный средний состав ОПОЗ кардинально отличается от среднего состава ОПОЗ за последний 1 млрд лет.

В зависимости от того, какой вклад в ОСЗ вносили разрушившиеся родительские астероиды различного состава, распределение ОСЗ по альбедо могло меняться. Если в течение последнего миллиарда лет среди ОСЗ были преимущественно объекты с альбедо, большим 0.14, то при современном числе ОСЗ с H , меньшим 17.75, число кратеров с диаметром $D > 15$ км было бы немного меньше, чем по нашим оценкам. Однако заметное влияние вариации характерного альбедо и класса ОСЗ на оценки числа кратеров имели бы только при рассмотрении временного интервала гораздо меньшего миллиарда лет. Для более аккуратных оценок числа образовавшихся кратеров лучше использовать не средние значения скоростей столкновений, а распределение по скоростям столкновений. Однако из-за неточности определения T_E в нашей работе такой учет не позволит улучшить общие оценки.

Для всей поверхности Луны отношение N_{est}/N_{obs} числа N_{est} образующихся за 1.1 млрд лет лунных кратеров с $D > 15$ км к числу аналогичных кратеров, полученному по данным работ (Losiak и др., 2015; Mazrouei и др., 2019a), близко к 5–6 при $T_E = 100$ млн лет и к 2 при $T_E = 300$ млн лет. Поэтому, несмотря на различные перечисленные выше неточности в определении числа кратеров для рассматриваемой модели можно утверждать, что отношение N_{est}/N_{obs} , скорее всего, не меньше 2. Такая возможность была допущена в (Ipatov и др., 2020) при рассмотрении кратеров 1-й степени сохранности из Морфологического каталога ГАИШ. По “новой хронологии” (Mazrouei и др., 2019a) число кратеров, отнесенных к коперниковскому периоду, уменьшилось примерно в два раза по сравнению с (Werner, Ivanov, 2015). Если признать, что число коперниканских кратеров возрастом < 1 млрд лет в новой хронологии верно, то это означает, что в “стандартной” хронологии Нойкума темп кратерообразования нужно уменьшить в примерно два раза.

*Возможность увеличения темпа
кратерообразования за последние 290 млн лет*

Основной результат статьи (Mazrouei и др., 2019a) состоит в том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени увеличилось в 2.6 раза 290 млн лет назад. Для модели, в которой вероятность столкновения ОСЗ с Луной равнялась современному значению за последние 290 млн лет, а до этого в течение 810 млн лет была в 2.6 раза меньше современного значения, число образовавшихся кратеров составило бы 0.6 (было бы в 1.7 раз меньше) от оценки,

полученной на основании современного числа ОСЗ. Если число кратеров на единице площади такое же, как по данным (Losiak и др., 2015) или (Mazrouei и др., 2019a) для морей, то число образовавшихся за 1 млрд лет 15 км кратеров, в 1.7 раз меньше современного числа кратеров, соответствует $T_E = 100 \times (267/187)/1.7 = 82$ млн лет или $T_E = 100 \times (267/77)/1.7 = 200$ млн лет для данных этих работ. Если число кратеров на единице площади такое же, как по данным (Mazrouei и др., 2019a) и (Losiak и др., 2015) для всей поверхности Луны, то число образовавшихся за 1 млрд лет кратеров, в 1.7 раз меньше современного числа кратеров, соответствует $T_E = 100 \times (267/44)/1.7 = 357$ млн лет (для Mazrouei и др., 2019a) и $T_E = 100 \times (267/53)/1.7 = 296$ млн лет (Losiak и др., 2015). Последние оценки близки к $T_E = 300$ млн лет (примерно такое значение рассматривалось в (Werner, Ivanov, 2015; Емельяненко, Нароенков, 2015)). Таким образом, при $T_E \leq 300$ млн лет все рассмотренные выше оценки N_{est} и N_{obs} допускают рост вероятности столкновения с Луной в 2.6 раза 290 млн лет назад. С этим выводом работы (Mazrouei и др., 2019a) наши оценки при $T_E \leq 100$ млн лет лучше согласуются, если считать, что число кратеров на единице поверхности всей Луны такое же, как для кратеров, расположенных в районе Океана Бурь и морей видимой стороны Луны. Поэтому можно предположить, что число кратеров на единице площади для всей поверхности Луны могло быть примерно таким же, как и для упомянутой выше области, т.е. могло быть больше оценок этого числа, полученных на основании данных (Losiak и др., 2015; Mazrouei и др., 2019a) для всей поверхности Луны.

Результаты сравнения моделей формирования кратеров с оценками возраста кратеров не только допускают возможность роста числа столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени в 2.6 раза 290 млн лет назад, но и не противоречат росту числа столкновений и за другой промежуток времени (не обязательно 290 млн лет). Хотя наши оценки не противоречат выводу работы (Mazrouei и др., 2019a) о том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени возросло в 2.6 раза 290 млн лет назад, однако они и не доказывают этот вывод, так как они допускают, что реальное число образовывавшихся за единицу времени лунных кратеров коперниковского периода могло быть в несколько раз больше, чем по оценкам (Mazrouei и др., 2019a), на всем промежутке времени, равном 1.1 млрд лет. Рост числа столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени в 2.6 раза 290 млн лет назад в работе (Mazrouei и др., 2019a) объясняется возможными катастрофическими разрушениями больших астероидов глав-

ного пояса, которые могли произойти в течение последних 300 млн лет.

Согласно (Bottke и др., 2007), недавнее катастрофическое разрушение большого астероида главного пояса 160 млн лет назад могло увеличить современное число ОСЗ с диаметром $d > 1$ км по сравнению со средним значением числа ОСЗ с диаметром $d > 1$ км, полученным для интервала в 1 млрд лет. Наши оценки не противоречат этому утверждению, так как согласно этим оценкам число N_{obs} наблюдаемых кратеров меньше числа N_{est} кратеров, полученного на основании современного числа ОСЗ. Однако большинство тел, образовавшихся при разрушении астероида 160 млн лет назад, возможно уже не находятся на орбитах ОСЗ. За это время они или приобрели гиперболические орбиты, или остались в астероидном поясе, или столкнулись с другими небесными телами.

Gladman и др. (2000) получили, что медианное время жизни ОСЗ составляет около 10 млн лет. В (Ипатов, 2019) медианное время динамической жизни тел с большими полуосями начальных орбит, не превышавшими 1.5 а. е., и начальными эксцентриситетами, равными 0.05 или 0.3, не превышало 20 млн лет. Поэтому, возможно, что разрушение астероида, вызвавшего современное увеличение (по сравнению со средним значением за последний миллиард лет) числа ОСЗ, произошло не 160 млн лет назад, как считалось в (Bottke и др., 2007), а сравнительно недавно. Для современного увеличения числа ОСЗ вследствие разрушения астероида, произошедшего 160 млн лет, нужно, чтобы большинство образовавшихся при таком разрушении осколков начали пересекать орбиту Земли через время, большее 100 млн лет после этого разрушения. Bottke и др. (2007) считали, что миграция осколков к резонансам 7 : 2 с Юпитером и 5 : 9 с Марсом происходила под влиянием эффекта Ярковского и YORP эффекта. Mazrouei и др. (2019a) также предполагали, что миграция осколков в резонансы, переводившие осколки к Земле, была медленной из-за негравитационных сил.

Nesvorný и др. (2002) считали, что семейство астероида (832) Karin образовалось 5.8 млн лет назад. Большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты этого астероида равны 2.865 а. е., 0.08° и 1° , соответственно. Это семейство находится недалеко от резонанса 5 : 2 с Юпитером (2.82 а. е.). Многие тела, попавшие в резонанс 5 : 2 с Юпитером, относительно быстро (за время порядка 30 тыс. лет) увеличивают свои эксцентриситеты и достигают орбит Марса и Земли (Ипатов, 1988a; 1989; 1992; 2000; Ipatov, 1992; Morbidelli, Gladman, 1998). Zappala и др. (1998) оценивали время, за которое фрагменты астероидных семейств приобретали резонансные орбиты, от

0.3 млн лет для семейств Gelion, Dora и Koronis (резонанс 5 : 2) до 110 млн лет для семейства Eos (резонанс 9 : 4), а продолжительность “астероидного дождя”, вызванного фрагментами, оценивалась ими от 2 до 30 млн лет. По их оценкам, 90% тел покидали резонанс 5 : 2 с Юпитером за 5 млн лет, а резонанс 3 : 1 с Юпитером – за 10 млн лет. Migliorini и др. (1997) получили, что медианные времена жизни фрагментов семейства Весты (Vesta), которые приобрели орбиты, соответствующие резонансам v_6 и 3 : 1, равны 2 млн лет. В (Ipatov, Mather, 2004a) времена, в течение которых афелийные расстояния астероидов были меньше 4.2 а. е., не превышали 2 и 9 млн лет для астероидов, стартовавших из резонансов 5 : 2 и 3 : 1 с Юпитером, соответственно, а среднее время жизни объектов, пересекавших орбиту Юпитера, было около 0.1 млн лет. Milani и Farinella (1995) пришли к выводу о том, что тела, находящиеся извне резонанса 5 : 2 с Юпитером на расстоянии 0.001 а. е., могут быть захвачены в резонанс за несколько миллионов лет из-за хаотической диффузии. На основании приведенных выше в этом абзаце результатов, мы полагаем, что распад малого тела, увеличившего количество наблюдаемых ОСЗ, мог произойти не более 10–20 млн лет назад. Например, этот распад мог произойти около 6 млн лет назад при образовании семейства Karin. Приведенные выше оценки времени миграции тел из астероидного пояса к орбите Земли и времени жизни ОСЗ обычно не превышают 10–30 млн лет и существенно меньше 290 млн лет, рассматриваемых в (Mazrouei и др., 2019a).

Vokrouhlický и др. (2017) полагали, что около 1 млрд лет назад образовалось семейство астероидов Веста, и пик притока осколков к Земле был в течение первых 100–300 млн лет после образования семейства. Однако в этом случае современный приток в ОСЗ имел бы совсем другие источники. Для такой модели (Vokrouhlický и др., 2017) пик образования кратеров на Луне был бы не в последние 290 млн лет, как в (Mazrouei и др., 2019a), а гораздо раньше. Для согласования с результатами (Mazrouei и др., 2019a) нужно, чтобы увеличение притока осколков к Луне было в течение последних 290 млн лет, а не за более короткий интервал времени.

Если произошло столкновение астероидов с плотностью, большей средней плотности астероидов, то какое-то время после столкновения образовавшиеся осколки вызывали образование на Луне кратеров большего размера, чем обычно. Однако нам кажется маловероятным, что одно столкновение астероидов породило столь продолжительное (300 млн лет) увеличение числа новых лунных кратеров. Трудно объяснить также причину, почему за последние 300 млн лет среднее число взаимных столкновений астероидов главного пояса увеличилось более чем в два раза

по сравнению со значениями среднего числа за предыдущие 700 млн лет. Может быть, современные оценки возраста кратеров, особенно вне морей, нуждаются в корректировке? Как отмечалось во введении, из рис. 1 видно, что данные (Losiak и др., 2015) занижают число кратеров с диаметром, меньшим 30 км. Однако для всей поверхности Луны, и особенно для морей, данные (Mazrouei и др., 2019a) дают еще меньшее число кратеров с диаметром, равным 15 км, чем данные (Losiak и др., 2015).

“Всплеск” бомбардировки соответствует более высокой кривой Нойкума. Кроме того, в зависимости от состава, масс и орбит астероидов, вызвавших этот всплеск, может со временем немного меняться форма этой кривой. Это связано с распределением осколков по массам и составу при различных столкновениях, а эта кривая также зависит от того, за какое время осколки достигают орбит ОСЗ. Осколки, рожденные в различных областях астероидного пояса, могут иметь различное распределение по элементам орбит, когда они станут ОСЗ. Это распределение может немного влиять на вероятность и скорость столкновения ОСЗ с Луной.

Из рис. 1 видно, что наши оценки числа коперниканских кратеров с диаметром, не меньшим 15 км, на единице площади при $T_E = 100$ млн лет находятся в неплохом соответствии с кривой, которая была бы продолжением кривой для данных (Losiak и др., 2015) для области морей, если эту кривую продолжить от значений при $D > 30$ км к меньшим значениям D параллельно кривой (Werner, Ivanov, 2015). То есть наши оценки при $T_E = 100$ млн лет соответствуют модели, в которой число коперниканских кратеров на единице площади для всей поверхности Луны было бы таким же, как и для области морей, если бы данные (Losiak и др., 2015) для $D < 30$ км были бы такими же полными, как и для $D > 30$ км. Для такой модели темп кратерообразования за последний 1.1 млрд лет мог быть постоянным, чтобы удовлетворить нашим расчетам кратерообразования при $T_E = 100$ млн лет. В этом случае не нужно придумывать объяснения, почему за последние 290 млн лет темп кратерообразования был больше, чем за предыдущие 800 млн лет.

Как отмечалось выше в разделе “вероятности столкновений объектов, сближающихся с Землей, с Луной”, если поднять вверх кривую зависимости числа столкновений за год с Землей тел с абсолютной яркостью, меньшей H , от H , приведенную на рис. 26 из работы (Granvik и др., 2018), в соответствии с вероятностью p_E столкновения ОПОЗ с диаметром не менее 1 км с Землей за год, близкой к 10^{-8} (т.е. при $T_E = 100$ млн лет), то полученная кривая будет гораздо лучше согласовываться с современными данными о вероятностях выпадений болидов, взятыми из (Brown и др.,

2013), и с ожидаемой частотой выпадений на Землю объектов типа Тунгусского явления, чем кривая, приведенная на этом рисунке.

ВЫВОДЫ

Проведено сравнение количества лунных кратеров с диаметром, большим 15 км, и возрастом, не превышающим 1.1 млрд лет, с оценками числа кратеров, которые могли образоваться за 1.1 млрд лет, если бы число околоземных объектов с диаметром, большим 1 км, и элементы их орбит за это время были близки к их современным значениям. Сравнение проводилось для кратеров на всей поверхности Луны и для области в районе Океана Бурь (Oceanus Procellarum) и морей видимой стороны Луны. При этих оценках использовались значения вероятностей столкновений околоземных объектов с Луной и зависимости диаметров кратеров от диаметров ударников, породивших эти кратеры.

Отмечено, что число известных коперниканских кратеров с диаметром $D \geq 15$ км на единице площади на морях по оценкам различных авторов не менее, чем в двое, превышает аналогичное число для остальной поверхности Луны.

Наши оценки не противоречат увеличению числа околоземных объектов после возможных катастрофических разрушений больших астероидов главного пояса, которые могли произойти в течение последних 300 млн лет, но и не доказывают это увеличение. В частности, они не противоречат выводу работы (Mazrouei и др., 2019a) о том, что число столкновений околоземных астероидов с Луной за единицу времени возросло в 2.6 раза 290 млн лет назад.

Число коперниканских лунных кратеров с диаметром, не меньшим 15 км, возможно больше, чем по данным (Mazrouei и др., 2019a).

При вероятности столкновения с Землей за год объекта, пересекающего орбиту Земли, (ОПОЗ) равной 10^{-8} (такая вероятность могла иметь место при рассмотрении больших интервалов времени), наши оценки числа кратеров соответствуют модели, в которой число 15-км коперниканских кратеров на единице площади для всей поверхности Луны было бы таким же, как и для области морей, если бы данные (Losiak и др., 2015) для $D < 30$ км были бы такими же полными, как и для $D > 30$ км. При такой вероятности столкновения ОПОЗ с Землей и для такой модели темп кратерообразования за последний 1.1 млрд лет мог быть постоянным.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам за весьма полезные многочисленные замечания, способствовавшие значительному улучшению статьи.

Работа выполнена в рамках госзаданий ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, ГАИШ МГУ и ИДГ РАН. Исследования вероятностей столкновений астероидов с Землей были поддержаны Грантом Минобрнауки по экзопланетам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Ред. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
- Емельяненко В.В., Нароенков С.А. Динамические особенности опасных околоземных объектов // Астрофизический бюллетень. 2015. Т. 70. № 3. С. 361–368.
- Ипатов С.И. Эволюция резонансных орбит астероидного типа и проблема существования люков // Кинематика и физика небесных тел. 1988а. Т. 4. № 4. С. 47–54.
- Ипатов С.И. Времена эволюции дисков планетезималей // Астрон. журн. 1988б. Т. 65. № 5. С. 1075–1085.
- Ипатов С.И. Изменения эксцентриситетов орбит астероидного типа в окрестности резонанса 2 : 5 // Письма в Астрон. журн. 1989. Т. 15. № 8. С. 750–760.
- Ипатов С.И. Изменения элементов орбит астероидного типа при резонансе 2 : 5 // Астрон. вестн. 1992. Т. 26. № 6. С. 26–53. (Ipatov S.I. Migration of bodies in the accretion of planets // Sol. Syst. Res. 1993. V. 27. № 1. P. 65–79).
- Ипатов С.И. Миграция тел в процессе аккумуляции планет // Астрон. вестн. 1993. Т. 27. № 1. С. 83–101. (Ipatov S.I. Migration of bodies in the accretion of planets // Sol. Syst. Res. 1993. V. 27. № 1. P. 65–79).
- Ипатов С.И. Миграция малых тел к Земле // Астрон. вестн. 1995. Т. 29. № 4. С. 304–330. (Ipatov S.I. Migration of small bodies to the Earth // Sol. Syst. Res. 1995. V. 29. № 4. P. 261–286).
- Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. Изд-во УРСС. 2000. 320 с. http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_29239, <http://booksee.org/book/1472075>
- Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 5. С. 349–379. (Ipatov S.I. Probabilities of collisions of planetesimals from different regions of the feeding zone of the terrestrial planets with the forming planets and the Moon // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 5. P. 332–361).
- Короновский Н.В. Общая геология: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения. М.: “КДУ”, “Добросвет”, 2018. ISBN 978-5-7913-1025-5. <https://bookonlime.ru/lecture/glava-2-stroenie-i-sostav-zemli>
- Маров М.Я., Ипатов С.И. Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 402–410. (Marov M. Ya., Ipatov S.I. Delivery of water and volatiles to the terrestrial planets and the Moon // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 392–400).
- Родионова Ж.Ф., Карлов А.А., Скобелева Т.П., Конотопская Е.В., Шевченко В.В., Козубский К.Э., Дехтярева К.И., Смолякова Т.Ф., Тишик Л.И., Федорова Е.А. Морфологический каталог кратеров Луны. М.: Изд. МГУ, 1987. 173 с.
- Ударные кратеры на Луне и планетах / Ред. Садовский М.А. [авторы: Базилевский А.Т., Иванов Б.А., Флоренский К.П. и др.] М.: Наука, 1983. 200 с.
- Bottke W.F., Nolan M.C., Greenberg R., Kolvoord R.A. Collisional lifetimes and impact statistics of near-Earth asteroids // Hazards due to comets and asteroids / Ed. Gehrels T. Tucson and London: Univ. Arizona Press, 1994. P. 337–357.
- Bottke W.F., Love S.G., Tytell D., Glotch T. Interpreting the elliptical crater populations on Mars, Venus, and the Moon // Icarus. 2000. V. 145. P. 108–121.
- Bottke W.F., Love S.G., Tytell D., Glotch T. Interpreting the elliptical crater populations on Mars, Venus, and the Moon // Icarus. 2000. V. 145. P. 108–121.
- Bottke W., Vokrouhlicky D., Nesvorny D. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor // Nature. 2007. V. 449. P. 48–53.
- Brown P., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. 2002. V. 420. P. 294–296.
- Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M.B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., de Groot-Hedlin C., Drob D.P., Edwards W., Evers L.G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. Iss. 7475. P. 238–241.
- Carry B. Density of asteroids // Planet. and Space Science. 2012. V. 73. P. 98–118. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.03.009>
- Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A. Earth impact effects program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // Meteorit. and Planet. Sci. 2005. V. 40. P. 817–840.
- Croft S.K. The excavation stage of basin formation: A qualitative model // Multiring Basins / Eds Schultz P.H., Merrill R.B. N.Y.: Pergamon Press, 1981. P. 207–225.
- Croft S.K. The scaling of complex craters / Proc. 15th Lunar and Planet. Sci. Conf. // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. Suppl. P. C828–C842.
- Davison T.M., Collins G.S., Elbeshausen D., Wunnemann K., Kearsley A. Numerical modeling of oblique hypervelocity impacts on strong ductile targets // Meteorit. and Planet. Sci. 2011. V. 46. № 10. P. 1510–1524.
- Dienes J.K., Walsh J.M. Theory of impact: Some general principles and the method of Eulerian codes // High Velocity Impact Phenomena / Ed. Kinslow R. N.Y.: Academic Press, 1970. P. 45–104.
- Dones L., Gladman B., Melosh H.J., Tonks W.B., Levison H.F., Duncan M. Dynamical lifetimes and final fates of small bodies: Orbit integrations vs Opik calculations // Icarus. 1999. V. 142. № 2. P. 509–524.
- Drolshagen E., Ott T., Koschny D., Drolshagen G., Dchmidt A.K., Poppe B. Velocity distribution of larger meteoroids and small asteroids impacting Earth // Planet. and Space Sci. 2020. V. 184. Id 104869. 10 p.
- Dvorak R., Pilat-Lohinger E. On the dynamical evolution of the Atens and the Apollos // Planet. and Space Sci. 1999. V. 47. P. 665–677.

- Elbeshausen D., Wünnemann K., Collins G.S.* Scaling of oblique impacts in frictional targets: Implications for crater size and formation mechanisms // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 716–731.
- Elbeshausen D., Wünnemann K., Collins G.S.* The transition from circular to elliptical impact craters // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2013. V. 118. P. 2295–2309.
- Gault D.E., Quaide W.L., Oberbeck V.R.* Impact cratering mechanics and structures // *Shock Metamorphism of Natural Materials* / Eds French B.M., Short N.M. Baltimore, MD: Mono Book Co., 1968. P. 87–99.
- Ghent R.R., Hayne P.O., Bandfield J.L., Campbell B.A., Allen C.C., Carter L.M., Paige D.A.* Constraints on the recent rate of lunar ejecta breakdown and implications for crater ages // *Geology*. 2014. V. 42. № 12. P. 1059–1062.
- Gilbert G.K.* The Moon's face: A study of the origin of its features // *Philosophical Society of Washington Bulletin VII*. 1893. P. 241–292.
- Gladman B., Michel P., Froeschlé C.* The near-Earth object population // *Icarus*. 2000. V. 146. № 1. P. 176–189.
- Granvik M., Morbidelli A., Jedicke R., Bolin B., Bottke W.F., Beshore E., Vokrouhlický D., Nesvorný D., Michel P.* Debaised orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects // *Icarus*. 2018. V. 312. P. 181–207.
- Harris A.W., D'Abramo G.* The population of near-Earth asteroids // *Icarus*. 2015. V. 257. P. 302–312.
- Hartmann W.K.* Inter-planet variations in scale of crater morphology – Earth, Mars, Moon // *Icarus*. 1972. V. 17. P. 707–713.
- Hergarten S., Wulf G., Kenkmann T.* Comment on “Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic” // *Science*. 2019. V. 365. Iss. 6450. eaaw7471. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7471>
- Holsapple K.A., Schmidt R.M.* On the scaling of crater dimensions. Pt. 1. Explosive processes // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 7247–7256.
- Holsapple K.A., Schmidt R.M.* On the scaling of crater dimensions. Pt. II. Impact processes // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 1849–1870.
- Holsapple K.A., Schmidt R.M.* Point source solutions and coupling parameters in cratering mechanics // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 6350–6376.
- Ipatov S.I.* Evolution of asteroidal orbits at the 5:2 resonance // *Icarus*. 1992. V. 95. № 1. P. 100–114.
- Ipatov S.I.* Comet hazard to the Earth // *Adv. Space Res.* 2001. V. 28. P. 1107–1116.
- Ipatov S.I.* Migration of planetesimals to the Earth and the Moon from different distances from the Sun // 50th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2019. #2594 (abstract).
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets // *Earth, Moon, and Planets*. 2003. V. 92. P. 89–98. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0305519>)
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of Jupiter-family comets and resonant asteroids to near-Earth space // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2004a. V. 1017. P. 46–65. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0308448>)
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // *Adv. Space Res.* 2004b. V. 33. P. 1524–1533. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>).
- Ipatov S.I., Mather J.C.* Migration of comets to the terrestrial planets // *Proc. of the IAU Symp.* № 236 “Near-Earth Objects, Our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk” (14–18 August 2006, Prague, Czech Republic) / Eds Milani A., Valsecchi G.B., Vokrouhlický D. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. P. 55–64. (<http://arXiv.org/format/astro-ph/0609721>).
- Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V.* Variation of near-Earth object population based on analysis of diameters of lunar craters // *The Ninth Moscow Solar System Symposium 9M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8–12, 2018). 2018. <https://ms2018.cosmos.ru/>, 9MS3-PS-77. P. 349–351.
- Ipatov S.I., Feoktistova E.A., Svetsov V.V.* Near-Earth object population and formation of lunar craters during the last billion of years // *Proc. IAU Symp. No. 345 “Origins: from the Protosun to the First Steps of Life”* / Eds Elmegreen B.G., Tóth L.V., Gudel M. Proc. of the IAU Symp. S345. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2020. P. 299–300.
- Ivanov B.A., Artemieva N.A.* Transient cavity scaling for oblique impacts // 32nd Lunar and Planet. Sci. Conf. 2001. #1327.
- Ivanov B.A., Artemieva N.A.* Numerical modeling of the formation of large impact craters // *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impact and Beyond* / Eds Koeberl C., MacLeod K.G. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Papers 356. 2002. P. 619–630.
- Ivanov B.A., Neukum G., Wagner R.* Size-frequency distributions of planetary impact craters and asteroids // *Collisional Processes in the Solar System* / Eds M.Ya. Marov, H. Rickman. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001. P. 1–34.
- Kalynn J., Johnson C.L., Osinski G.R., Barnouin O.* Topographic characterization of lunar complex craters // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. № 1. P. 38–42. <https://doi.org/10.1029/2012gl053608>
- Kirchoff M.R., Chapman C.R., Marchi S., Curtis K.M., Enke B., Bottke W.F.* Ages of large lunar impact craters and implications for bombardment during the Moon's middle age // *Icarus*. 2013. V. 225. P. 325–341. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.03.018>
- Kruger T., Fey J., Kenkmann T.* The simple-to-complex transition of lunar craters: New precise depth/diameter measurements of mare and highland craters // 46th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2015. #2219.
- Kruger T., Hergarten S., Kenkmann T.* Deriving morphometric parameters and the simple-to-complex transition diameter from a high-resolution, global database of fresh lunar impact craters // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2018. V. 123. P. 2667–2690.
- Le Feuvre M.L., Wieczorek M.A.* Nonuniform cratering of the Moon and a revised crater chronology of the inner Solar System // *Icarus*. 2011. V. 214. P. 1–20.
- Lammer H., Scherf M., Leitzinger M., Odert P., Kubyschkina D., Burger C., Johnstone C.P., Mairdl T., Güdel M., Tosi N., Erkaev N.V., Fossati L.* Atmospheric noble gas isotope and bulk K/U ratios as a constraint on the early evolution of Venus and Earth // *The Tenth Moscow Solar System Symposium 10M-S3* (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 7–11, 2019). <https://ms2019.cosmos.ru/>, 2019. 10MS3-VN-03. P. 70–71.
- Losiak A., Kohout T., O'Sullivan K., Thaisen K., Weider S.* Lunar Impact Crater Database // *Lunar and Planet. Inst. Lunar exploration Intern Program*, 2009. Updated by Ohman T. 2011.

- Losiak A., Kohout T., O'Sullivan K., Thaisen K., Weider S.* Lunar Impact Crater Database // Lunar and Planet. Inst. Lunar exploration Intern Program, 2009. Updated by Ohman T. 2015. <https://www.lpi.usra.edu/scientific-databases/>, https://www.lpi.usra.edu/lunar/surface/Lunar_Impact_Crater_Database_v08Sep2015.xls
- Mazrouei S., Ghent R.R., Bottke W.F.* Application of a new method for exploring the Copernican cratering record // Proc. Early Solar System Impact Bombardment III. 2015. Abstract № 3032.
- Mazrouei S., Ghent, R.R., Bottke W.F., Parker A.H., Gernon T.M.* Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic // Science. 2019a. V. 363. P. 253–255.
- Mazrouei S., Ghent R.R., Bottke W.F., Parker A.H., Gernon T.M.* Response to Comment on “Earth and Moon impact flux increased at the end of the Paleozoic” // Science. 2019b. V. 365. Iss. 6450. P. eaaw9895. <https://doi.org/10.1126/science.aaw9895>
- McEwen A.S., Moore J.M., Shoemaker E.M.* The Phanerozoic impact cratering rate: Evidence from the farside of the Moon // J. Geophys. Res.: Planets. 1997. V. 102. № E4. P. 9231–9242.
- Melosh H.J.* Impact cratering: A geologic process. N.Y.: Oxford University Press (Oxford Monographs on Geology and Geophysics, No. 11), 1989. 245 p.
- Melosh H.J., Ivanov B.A.* Impact crater collapse // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1999. V. 27. P. 385–415.
- Migliorini F., Morbidelli A., Zappala V., Gladman B.J., Bailey M.E., Cellino A.* Vesta fragments from v6 and 3 : 1 resonances: Implications for V-type NEAs and HED meteorites // Meteorit. and Planet. Sci. 1997. V. 32. № 6. P. 903–916.
- Milani A., Farinella P.* An asteroid on the brink // Icarus. 1995. V. 115. P. 209–212.
- Minton D.A., Richardson J.E., Fassett C.I.* Re-examing the main asteroid belt as the primary source of ancient lunar craters // Icarus. 2015. V. 247. P. 172–190.
- Morbidelli A., Gladman B.* Orbital and temporal distributions of meteorites originating in the asteroid belt // Meteorit. and Planet. Sci. 1998. V. 33. № 5. P. 999–1016.
- Morbidelli A., Delbo M., Granvik M., Bottke W.F., Jedicke R., B. Bolin, Michel P.* Debaised albedo distribution for Near Earth Objects // Icarus. 2020. V. 340. Id. 113631. 8 p.
- Nesvorný D., Bottke W.F., Jr., Dones L., Levison H.F.* The recent breakup of an asteroid in the main-belt region // Nature. 2002. V. 417. № 6890. P. 720–771.
- Neukum G., Ivanov B.A.* Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data // Hazards Due to Comets and Asteroids / Eds Gehrels T. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 1994. P. 359–416.
- Neukum G., Koenig B.* Dating of individual craters // Proc. 7th Lunar Sci. Conf. 1976. P. 2867–2881.
- Neukum G., Koenig B., Arkani-Hamed J.* A study of lunar impact crater sizedistributions // Moon. 1975. V. 12. P. 201–229.
- Neukum G., Ivanov B.A., Hartmann W.K.* Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system // Chronology and Evolution of Mars / Eds Kallenbach R., Geiss J., Hartmann W.K. Dordrecht: Kluwer Acad. Press, 2001. P. 55–86.
- Opik E.J.* Collision probabilities with the planets and the distribution of interplanetary matter // Proc. R. Irish Acad. Sect. A. 1951. V. 54. P. 165–199.
- Pierazzo E., Melosh H.J.* Melt production in oblique impacts // Icarus. 2000. V. 145. P. 252–261.
- Pike R.J.*, Size-dependence in the shape of fresh impact craters on the moon // Impact and Explosion Cratering: Planetary and Terrestrial Implications / Eds D.J. Roddy, R.O. Pepin, R.B. Merrill. Tucson: Univ. Arizona Press, 1977. P. 489–509.
- Pokorny P., Vokrouhlicky D.* Opik-type collision probability for high-inclination orbits: Targets on eccentric orbits // Icarus. 2013. V. 226. P. 682–693.
- Roddy D.J., Pepin R.O., Merrill R.B.* Impact and explosion cratering. Planetary and terrestrial implications // Proc. of the symp. on planetary cratering mechanics (Flagstaff, Arizona, September 13–17, 1976). N.Y.: Pergamon Press, 1977. P. 1301.
- Schmidt R.M., Housen K.R.* Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering // Int. J. Impact Eng. 1987. V. 5. P. 543–560.
- Silber E.A., Osinski G.R., Johnson B.C., Grieve R.A.F.* Effect of impact velocity and acoustic fluidization on the simple-to-complex transition of lunar craters // J. Geophys. Res.: Planets. 2017. V. 122. № 5. P. 800–821. <https://doi.org/10.1002/2016je005236>
- Stuart J.S., Binzel R.P.* Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects // Icarus. 2004. V. 170. P. 295–311.
- Usui F., Kasuga T., Hasegawa S., Ishiguro M., Kuroda D., Mülller T.G., Ootsubo T., Matsuhara H.* Albedo properties of main belt asteroids based on the all-sky survey of the infrared astronomical satellite AKARI // Astrophys. J. 2013. V. 762. Article id. 56. 14 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/762/1/56>
- Vokrouhlický D., Pokorny P., Nesvorný D.* Opik-type collision probability for high-inclination orbits // Icarus. 2012. V. 219. P. 150–160.
- Vokrouhlický D., Bottke W.F., Nesvorný D.* Forming the Flora Family: Implications for the near-Earth asteroid population and large terrestrial planet impactors // Astron. J. 2017. V. 153. Iss. 4. Article id. 172. 23 p.
- Werner S.C., Ivanov B.A.* Exogenic dynamics, cratering, and surface ages // Treatise on Geophysics (Second Edition). 2015. V. 10. P. 327–365.
- Wetherill G.W.* Collisions in the asteroid belt // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 2429–2444.
- Wieczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F., Kiefer W.S., Taylor G.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Solomon S.C., Andrews-Hanna J.C., Asmar S.W., Konopliv A.S., Lemoine F.G., Smith D.E., Watkins M.M., Williams J.G., Zuber M.T.* The crust of the Moon as seen by GRAIL // Science. 2013. V. 339. Iss. 6120. P. 671–675.
- Wilhelms D.E.* The geologic history of the Moon. U.S. Geological Survey Professional Paper. 1987. 1348. 302 p.
- Wilhelms D.E., Byrne C.J.* Stratigraphy of lunar craters, Image again online: <http://www.imageagain.com/Strata/StratigraphyCraters.2.0.htm>. 2009.
- Zappalà V., Cellino A., Gladman B.J., Manley S., Migliorini F.* Asteroid showers on Earth after family breakup events // Icarus. 1998. V. 134. № 1. P. 176–179.