

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ИМПАКТНЫХ СОБЫТИЙ

И. И. Амелин, В. К. Гусяков, З. А. Ляпидевская

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 681.3

Предложен новый метод оценки частоты падений небесных тел на Землю, учитывающий скорость эрозии кратеров. Иллюстрация применения метода дается на примере анализа содержания экспертной базы данных импактных структур Земли EDEIS (Expert database on the Earth impact structures), которая была разработана и используется в лаборатории цунами ИВМиМГ СО РАН. EDEIS содержит как полностью доказанные кратеры, так и структуры, импактное происхождение которых нуждается в подтверждении. Для учета процессов эрозии кратеров на поверхности Земли используется уравнение баланса. Распределение частоты падений от диаметра кратера содержит одну эмпирическую константу и применяется в диапазоне диаметров кратеров от 0,025 до 200 км. Показано хорошее совпадение расчетов с оценками частоты падений, полученными другими авторами. Установлена зависимость частоты падений от кинетической энергии, диаметра кратера и диаметра ударника.

Ключевые слова: импактные кратеры Земли, база данных, оценки частоты падений.

A new method of estimating the impact frequency of celestial bodies on the Earth, with corrections for the rate of crater erosion is proposed. This method is applied to the content of the Expert Database on the Earth's impact structures (EDEIS) that has been developed and is being maintained in the Tsunami Laboratory of the ICMMG SB RAS. The EDEIS contains as fully proven and justified craters as structures whose impact origin is still needed to be confirmed. To take into account the crater erosion on the Earth's surface, the balance equation is used. The crater size-frequency distribution contains a single empirical constant and is applied to the range of crater diameters varying from 0.025 to 200 km. The results show a good agreement with the estimates of impact frequencies obtained by other authors. The dependence of impact frequency on the kinetic energy, the diameter of the crater and projectile diameter has been established.

Key words: Earth impact craters, database, estimates of the impact frequency.

Введение. Космическое пространство, в котором осуществляется движение планет и Солнечной системы в целом, — это не только сверхразреженный газ, близкий к состоянию вакуума, заполненный высокоэнергетическими заряженными частицами, излучаемыми Солнцем и другими звездами нашей Галактики. Помимо планет и их спутников, в нем движется огромное число малых комических тел — комет, астероидов и их обломков. Из-за несовершенства астрономических приборов долгое время считалось, что астероиды сосредоточены только в обширном поясе, располагающемся между орбитами Марса и Юпитера, и нашей планете они не угрожают. Но в 1980-х годах, по мере развития наблюдательной техники, астрономы обнаружили и выделили в отдельный класс NEO (Near Earth Objects)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-07-00564).

многочисленные астероиды, орбиты которых в перигелии сближаются с Солнцем на расстояние менее 1,3 астрономической единицы. Часть НЕО астероидов способна пересекать орбиту Земли, создавая угрозу близкого сближения или даже столкновения с нашей планетой.

Первый всесторонний анализ астероидной опасности был выполнен в 1992 году группой экспертов НАСА под руководством Д. Моррисона. В обзорном докладе [1], подготовленном этой группой, была дана количественная оценка опасности столкновения в зависимости от размера сталкивающегося тела (или его энергии) и предложена стратегия противостояния этой опасности.

В научном сообществе осознание реальности и серьезности космической угрозы произошло только в начале 2000-х годов. Международный совет научных союзов (ICSU) провел в декабре 2004 г. представительную международную конференцию “Кометно-астероидная опасность и будущее человечества”, итогом которой стала коллективная монография [2], рассматривающая все аспекты этой проблемы: от астрономических и геологических до общественно-политических и социальных. Изучение поверхности Луны космическими аппаратами, новые данные из астрономии, геологии и палеонтологии, изучение импактных кратеров помогли получить количественные оценки опасности столкновений, способных нарушить равновесие окружающей среды, привести к разрушению техногенных объектов и повлиять на биосферу Земли. Болидный взрыв и падение осколков метеорита под Челябинском в феврале 2013 г., вызвавшие серьезные разрушения в крупном промышленном центре, еще раз подтвердили реальность угрозы из космоса.

В России одним из первых научных учреждений, начавших серьезное изучение проблемы кометно-астероидной опасности, стал Вычислительный центр СО РАН, в котором с начала 1990-х годов под руководством академика А. С. Алексеева проводились работы по данной тематике. Исследовательской группой, в состав которой входили В. Е. Петренко, Б. С. Зейлик, З. А. Ляпидевская, Г. И. Салов и др., проводились работы по методике изучения кольцевых структур, поиску критериев и способов доказательства их импактного генезиса, по методам оценки частоты падения небесных тел на Землю, исследовались возможности заблаговременного обнаружения опасных тел и изменения их траекторий, проблемы космического мусора. Был создан первый электронный каталог идентифицированных на тот момент импактных структур Земли [3]. Настоящая работа является продолжением этой серии исследований кометно-астероидной опасности, в которой на основе гораздо более полного набора данных об импактных структурах Земли делается попытка уточнения частоты и масштаба импактных воздействий, угрожающих Земле на современном этапе ее геологической истории.

Обзор методов, используемых для оценки частоты импактных падений. Важнейшей компонентой изучения опасности падений космических тел на Землю является получение оценок частоты падений в зависимости от размера (или энергии) падающего тела. Существующие подходы к оценке частоты падений от диаметра ударника d можно разделить на следующие группы:

— Астрономический подход, основанный на определении числа и физических характеристик космических тел, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Этот метод дает достаточно точную оценку ожидаемой частоты падений крупных астероидов ($d > 1000$ м) [4–6].

— Планетологический подход использует данные о возрасте и размерах метеоритных кратеров на Луне и ближайших к Земле планетах (Меркурий, Венера, Марс). Методика позволяет оценить частоту падений крупных астероидов ($d > 300 - 400$ м), для которых атмосфера Земли практически не влияет на конечную скорость столкновения и диаметр кратера [7–9].

— Инструментальные наблюдения за атмосферой Земли, с помощью которых фиксируются близкие пролеты, взрывы и падения мелких астероидов ($d < 10$ м) в атмосфере Земли — оптические и акустические следы импактных событий. Этот метод основан на обработке космических снимков атмосферы Земли и данных наземных инфразвуковых и сейсмических сетей [10–12].

— Геолого-геофизический подход, основанный на анализе данных об импактных кратерах Земли (диаметр, возраст, пространственное распределение), содержащихся в специальных каталогах импактных структур, идентифицированных на поверхности Земли. Метод позволяет получать оценки частоты падений космических тел, начиная с диаметров $d > 10 - 20$ м [13–15]. Для оценки частоты падений более мелких тел ($d < 10$ м) пользуются данными метеоритных каталогов [16].

Преимущество последнего подхода заключается в том, что ударные кратеры и метеориты, идентифицируемые на поверхности Земли, являются неоспоримым доказательством столкновений нашей планеты с космическими телами, произошедших в геологическом и историческом прошлом. Основная сложность применения данного подхода связана с интенсивными экзогенными процессами, которые с одной стороны затрудняют обнаружение кратеров, нивелируя их рельеф с течением времени, а с другой стороны образуют структуры, сходные по некоторым диагностическим признакам с импактными кратерами. Другая проблема геолого-геофизического подхода состоит в невозможности учета кометных ударов по поверхности Земли, которые могут не оставлять наземных кратеров. Как показывают наблюдения и теоретические расчеты [17], относительно крупные кометные тела диаметром до 50 м и с кинетической энергией до 50–100 Мт ТНТ при столкновении с Землей не образуют классических наземных кратеров. Для учета комет при использовании геолого-геофизического подхода необходимо скорректировать оценки частоты падений, используя зависимость, отражающую вклад комет в общий поток опасных космических тел [17].

До 1970-х годов геолого-геофизический подход практически не использовался в силу небольшого числа известных на то время импактных структур Земли. В конце 1970-х годов, по мере осознания важности проблемы импактных воздействий и с увеличением степени геологической изученности поверхности Земли, число известных импактных структур стало быстро возрастать, что дало возможность получения оценок частоты падений. Простейшие эмпирические зависимости распределения кратеров по диаметру были получены в 1979 г. А. Дабига и др. [18] на основе данных о 116 кратерах. В этой работе показано, что наиболее вероятное распределение кратеров по диаметру и возрасту удовлетворяет условию: $0, 1 \leq \frac{\sqrt{T}}{D} \leq 10$, где T — время релаксации (год), D — диаметр кратера (м). Более подробное исследование времени существования импактных структур в зависимости от диаметра ($D > 1$ км) и типа геологической истории мишени было выполнено в 1985 г. В. Масайтисом и др. [19].

Основная масса исследователей, использующих геолого-геофизический метод, проводит оценку частоты падений на всей поверхности Земли путем подсчета количества крупных метеоритных кратеров, обнаруженных в наиболее развитых и геологически изученных регионах мира (Канада, США, Австралия, Западная Европа) с учетом их возраста. Среди них следует отметить работу Ю. Шумейкера 1977 г. [20], в которой рассматриваются два альтернативных подхода — астрономические наблюдения за потенциально опасными астероидами и анализ известных импактных кратеров с диаметром $D \geq 10$ км на Земле. На основе астрономических наблюдений получена оценка скорости кратерообразования, равная $(0, 7 \pm 0, 35)10^{-14}$ км⁻²год⁻¹ [20]. Оценка, полученная на основе характеристик четырех достоверных структур возрастом менее 500 млн лет, расположенных на площади 7×10^5 км² в

бассейне реки Миссисипи, равна $(2, 2 \pm 1, 1)10^{-14}$ км⁻² год⁻¹ или одному кратеру диаметром 10 км на всей поверхности Земли в течение 90 тыс. лет.

В 1979 г. Р. Грив и М. Денс в [21] на основе характеристик 15 кратеров диаметром около 20 км и возрастом до 600 млн лет, расположенных на кристаллических щитах (Канадском, Украинском и Скандинавском), получили оценку скорости кратерообразования, равную $(3, 5 \pm 1, 3)10^{-15}$ км⁻² год⁻¹. В 1983 г. Ю. Шумейкером опубликована работа [22], где впервые приведена оценка частоты падений космических тел в широком диапазоне кинетической энергии ударников — от 1 кт до 10⁵ Мт ТНТ. Для оценки частоты падений тел с кинетической энергией 1–10 кт ТНТ использованы данные наблюдений за болидами (телескопные и спутниковые наблюдения). Благодаря использованию данных по наземным ядерным испытаниям, в этой работе также была определена эмпирическая зависимость кинетической энергии удара от диаметра кратера и плотности пород мишени. В 1994 г. Р. Грив и Ю. Шумейкер опубликовали работу [13], где на основе данных для 140 импактных кратеров диаметром более 1 км построена зависимость частоты падений от диаметра. Показано, что эта зависимость имеет степенной вид $N_c \propto D^{-1,8}$ с изломом при $D \sim 20$ км, что объясняется существенным торможением в земной атмосфере тел, образующих кратеры диаметром менее 20 км, а также малым (по геологическим меркам) временем существования таких кратеров. В [13] получена оценка скорости кратерообразования для структур диаметром около 20 км и возрастом более 120 млн лет, равная $(5, 6 \pm 2, 8)10^{-15}$ км² год⁻¹. В работах, опубликованных в 1999 и 2000 годах Д. Хугесом [23, 24], получены дифференцированные оценки скорости кратерообразования за последние 125 ± 20 млн лет в достаточно широком диапазоне диаметров: $2, 4 < D < 35$ км. Например, $(12, 0 \pm 0, 7)10^{-15}$ км⁻²год⁻¹ при $D \geq 2, 4$ км, $(9, 5 \pm 0, 6)10^{-15}$ км⁻²год⁻¹ при $D \geq 5$ км, $(6, 5 \pm 0, 5)10^{-15}$ км⁻²год⁻¹ при $D \geq 12$ км, $(3, 0 \pm 0, 3)10^{-15}$ км⁻²год⁻¹ при $D \geq 22$ км. При этом использованы данные для 56 кратеров в Северной Америке, Северной Европе и Австралии. Показано, что оценки предыдущих исследователей были существенно завышены.

Учет защитной функции атмосферы Земли для мелких тел впервые проведен в 2006 г. П. Бланд и Н. Артемьевой [25] с использованием численного моделирования. В модели учитывается торможение, абляция и фрагментация при движении небесных тел в плотных слоях атмосферы. Рассмотрены случаи падения железного и каменного метеоритов массой от 1 кг до 10¹² кг, что соответствует диаметру сферического тела d от 6 см до 1 км. Показано существенное влияние атмосферы на конечную скорость соударения космических тел с поверхностью и на размеры кратера при диаметре ударника $d < 50$ м. Для проверки адекватности модели при малых размерах тел ($d < 10$ м) использованы данные болидной сети. Полученная зависимость частоты падений от массы ударника либо диаметра кратера хорошо согласуется с наблюдениями и опубликованными результатами других исследователей, использующих астрономический и геолого-геофизический подходы.

В ряде работ проводится теоретическая оценка числа хорошо сохранившихся импактных структур Земли с учетом интенсивности процессов эрозии на различных участках поверхности. Например, в [26], где скорость разрушения кратеров определяется по интенсивности эрозионного среза (м/год), возможное число структур диаметром более 1 км на территории бывшего СССР оценивается в 2000 шт. В работе А. Вальтера и Е. Гурова [27] общее число структур фанерозойского возраста диаметром $D > 1$ км на всей поверхности Земли с учетом возможной эрозии оценивается в пределах 2550–3570. Подобная оценка получена С. Стьюартом в [15] с помощью функции распределения числа кратеров по размерам [25]. Согласно [15], общее число кратеров диаметром более 1 км на всех континентах и шельфе (34 % от

площади поверхности Земли) лежит в пределах от 453 до 1621 (медианное значение — 845). Значительный разброс полученных данных связан с существенным влиянием атмосферы и параметров траектории движения на конечную скорость столкновения космических тел, образующих при столкновении с Землей кратеры диаметром около 1 км.

Необходимо отметить, что в настоящее время дополнительно к 175–185 (по разным каталогам) достоверным импактным структурам известно более 700 предполагаемых структур, сведения о которых имеются в ряде каталогов [28–30]. Среди них большое число структур находится на территории России, например, в Московской [31] и Нижегородской областях [32]. Некоторые из этих структур по результатам последующих исследований исключаются из числа кратерных образований, однако значительная часть со временем переходит в разряд структур с доказанным импактным генезисом.

Важным фактором для получения частотных оценок является уточнение возраста (времени образования структуры), что особенно важно для молодых кратеров. Так, например, в [33] приведены убедительные факты, свидетельствующие в пользу гораздо более молодого возраста известного кратера Жаманшин в Северном Казахстане — 10–12 тыс. лет вместо 1 млн лет, как считалось ранее.

В настоящей работе для получения оценок частоты падения космических тел на Землю используются данные как по доказанным структурам, так и по структурам, импактный генезис которых находится в процессе исследования и верификации, что находит отражение в их индексе достоверности (см. ниже). Таким образом, объем данных, используемых для анализа, может быть значительно увеличен, что может повысить достоверность оценок.

Экспертная база данных по импактным структурам Земли. В данной работе для получения оценок частоты импактных падений на Землю используется база данных по импактным структурам Земли EDEIS (Expert Database on the Earth Impact Structures) [3, 30, 34–36], которая поддерживается в лаборатории цунами ИВМиМГ СО РАН в Новосибирске. Помимо полностью подтвержденных импактных структур, база EDEIS содержит сведения о предполагаемых структурах, импактный генезис которых находится в процессе проверки и доказательства.

База данных построена на основе СУБД MS Access и снабжена специализированной графической системой PDM/IMP (Parametric Data Manager), работающей под управлением операционной системы Windows и предоставляющей удобный пользовательский интерфейс для поиска, сортировки, обработки и визуализации данных [36]. Полноформатная версия базы данных включает 20 полей и вместе с поддерживающей ее графической оболочкой имеет объем порядка 500 Мб.

Web-версия базы данных включает 14 основных полей (страна или регион, название структуры, широта, долгота, диаметр, возраст, индекс достоверности, тип структуры, глубина истинного дна кратера, число структур в кратерном поле, степень эрозии, вид на поверхности Земли, вид из космоса, породы мишени) и доступна по адресу tsun.ssc.ru/nh/impact.php. Ресурс позволяет проводить выборку данных по первым семи полям и сортировать данные по любому полю.

Текущая версия EDEIS содержит параметрические данные о 1117 структурах. Для каждой структуры указывается индекс достоверности V , отражающий степень уверенности в импактном генезисе структуры, который варьируется от $V = 4$ (подтвержденные) до $V = 0$ (отклоненные) с промежуточными значениями $V = 3$ (вероятные), $V = 2$ (возможные) и $V = 1$ (предложенные для дальнейшего изучения). Классификация структур по индексу достоверности основана на экспертных оценках и отражает наличие критериев импактности

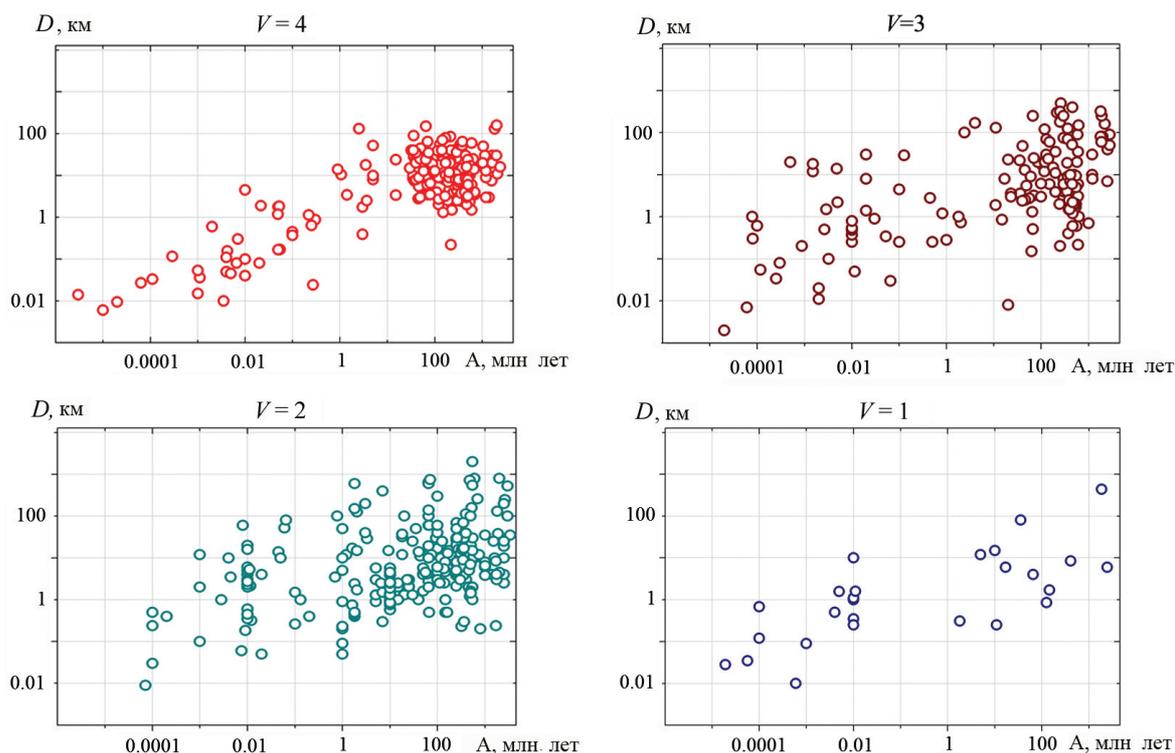


Рис. 1. Распределение импактных структур Земли по возрасту и диаметру, имеющих индекс достоверности $V = 1 - 4$, (по данным EDEIS [30])

на четырех различных уровнях — морфологическом, структурно-геологическом, петрографическом и микроструктурном. В дополнение к параметрической информации, база данных содержит свыше 3600 фотографий, карт и диаграмм, 956 текстовых описаний и 1512 библиографических ссылок.

Распределение числа структур в базе данных по индексу достоверности V следующее: 212 ($V = 4$), 187 ($V = 3$), 501 ($V = 2$) и 98 ($V = 1$) — всего 998. Оставшиеся 119 структур имеют индекс достоверности $V = 0$ и сохраняются в базе данных для того, чтобы предотвратить их повторное введение, поскольку информация об этих геологических объектах так или иначе присутствует в литературе и в Интернете. На рис. 1 приведено распределение числа структур по возрасту A и диаметру D для различных индексов достоверности. Эти распределения показывают, что наиболее “населенной” является область структур с возрастом $A > 10$ млн лет и диаметром $D > 1$ км. Число кратеров меньшего диаметра существенно меньше, в частности, вследствие их эрозии. В связи с малой степенью изученности кратеров с $V = 1$ в дальнейшем анализе используются структуры с индексом достоверности $V = 2 - 4$.

На рис. 2 и 3 показано географическое расположение импактных кратеров на поверхности Земли. Размер кружков пропорционален диаметру кратеров, цвет соответствует четырем группам по возрасту, временные границы которых указаны на врезке. На этих рисунках видно, что подавляющее число структур расположено на суше, занимающей, как известно, не более 25 % от общей площади поверхности Земли. При этом плотность распределения структур по континентам крайне неравномерна и отражает, в основном, возраст земной коры, степень развития эрозионных процессов и детальность геологической изученности территории.

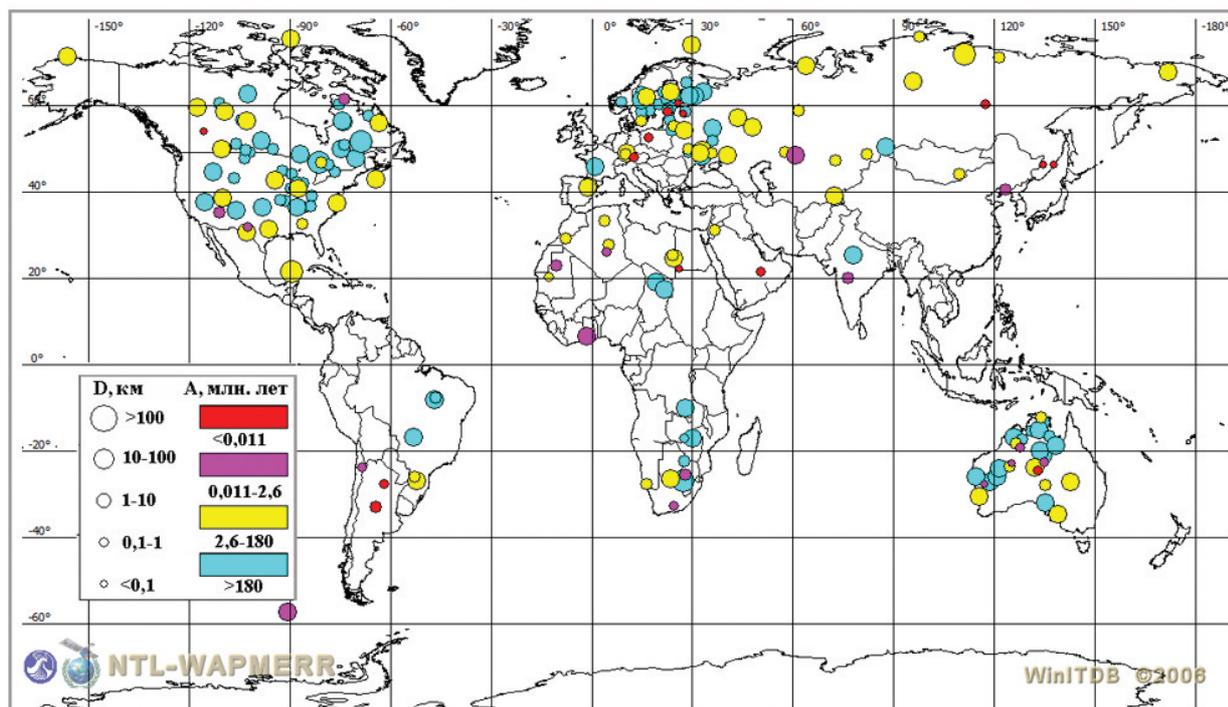


Рис. 2. Географическое распределение на поверхности Земли 200 достоверных ($V = 4$) импактных структур, имеющих оценки возраста и диаметра (по данным EDEIS [30])

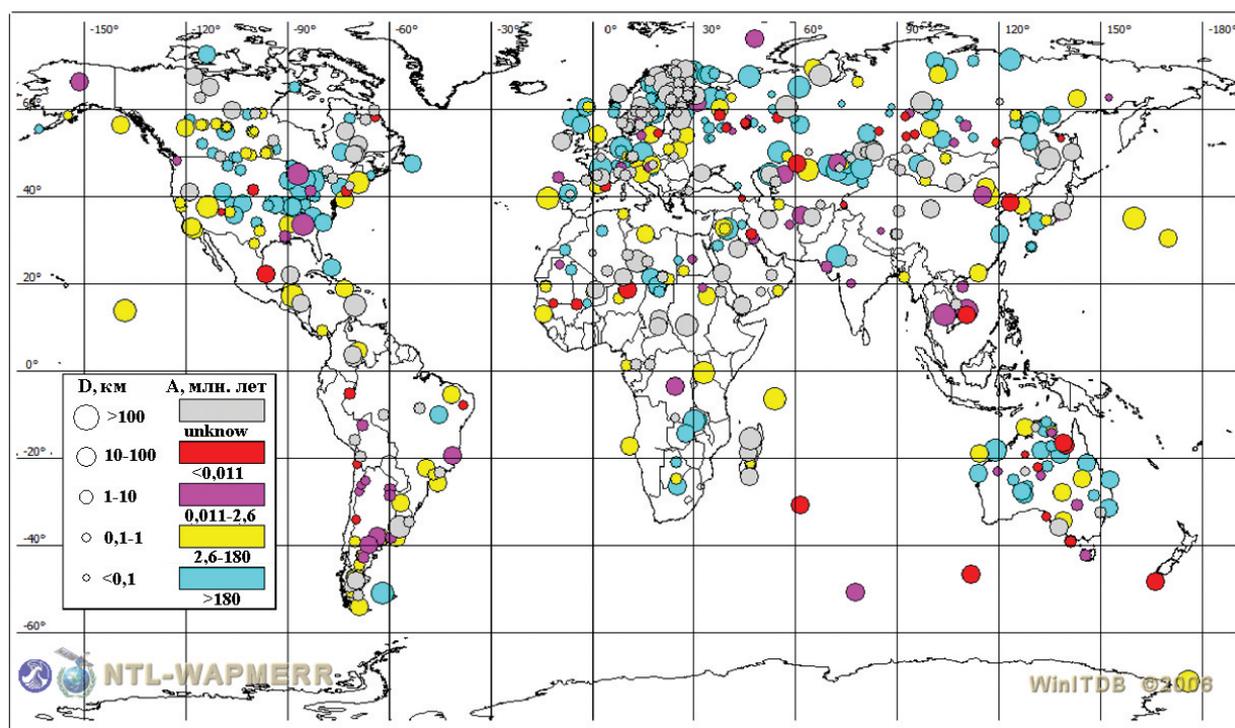


Рис. 3. Географическое распределение на поверхности Земли 685 предполагаемых импактных структур, имеющих индекс достоверности $V = 2$ и 3, из которых 396 имеют оценки возраста и диаметра (по данным EDEIS [30])

Методика расчета частоты падения астероидов. Обнаруженные на поверхности Земли импактные структуры являются самыми надежными свидетельствами столкновения

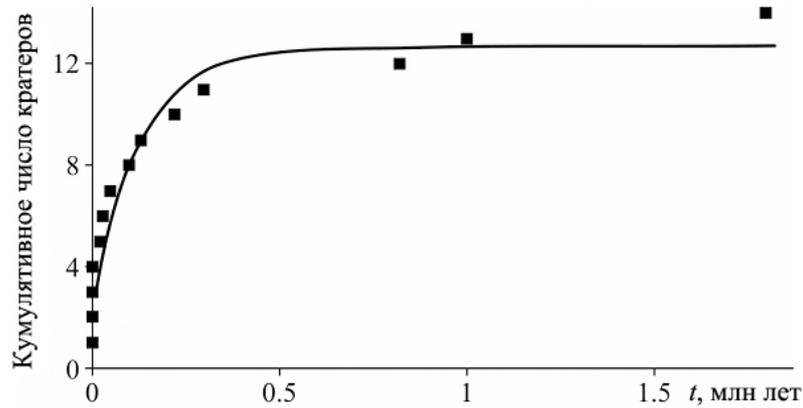


Рис. 4. Зависимость кумулятивного числа импактных структур диаметром $D = 0,8 - 1,6$ км от возраста (по данным EDEIS [30])

с Землей комет и астероидов. Однако их число существенно меньше реального числа падений небесных тел. Это связано с недостаточной изученностью обширных территорий суши и, в особенности, морского дна, с геологическими процессами, происходящими на поверхности Земли, приводящими к исчезновению кратеров с течением времени. Поскольку массив данных о возрасте импактных структур в настоящее время является недостаточно полным, вопрос об изменении скорости кратерообразования на различных этапах истории Земли остается дискуссионным. Поэтому воспользуемся общепринятым допущением о том, что скорость кратерообразования является постоянной величиной в течение последних 3,5 млрд лет [37]. Сделанное допущение значительно упрощает процедуру получения оценок частоты падений небесных тел и позволяет получить их в аналитическом виде.

Простейшим математическим описанием процесса кратерообразования является уравнение баланса, приведенное в [37] и ряде других работ, согласно которому скорость изменения числа кратеров диаметром D от времени t определяется разностью скоростей кратерообразования и исчезновением таких структур с поверхности Земли в результате эрозии:

$$\frac{dN(D, t)}{dt} = N_1(D) - N(D, t)/T(D), \quad (1)$$

где $N(D, t)$ — число наблюдаемых кратеров, $N_1(D)$ — скорость кратерообразования (год^{-1}), связанная с потоком астероидов, падающих на Землю, $N(D, t)/T(D)$ — скорость эрозии кратеров (год^{-1}), $T(D)$ — время релаксации кратера (год). Рассмотрим уравнение (1) в интервалах: $D_L \leq D \leq D_R$, полагая $D = \text{const}$. Тогда его решение можно представить в виде:

$$N(t) = N_1 T (1 - \exp(-t/T)). \quad (2)$$

Для иллюстрации полученной зависимости числа обнаруженных кратеров от времени проведем аппроксимацию кумулятивного количества структур ($N > t$) в диапазоне $D = 0,8 - 1,6$ км ($E = 5 - 50$ Мт ТНТ), используя данные каталога EDEIS [30]. На рис. 4. точками показано кумулятивное число выявленных структур в зависимости от возраста (миллион лет), и аппроксимирующая их функция $N(t) = -9,859 \exp(-t/0,127) + 12,68$.

Поскольку при построении аппроксимационной зависимости используется неполный набор данных, необходимо оценить реальное число импактных падений на Землю за последние 3,5 млрд лет. Будем предполагать, что падение астероида равновероятно в любой точке

Таблица 1

Зависимость частоты падений от размера и кинетической энергии ударника (каменный метеорит)

Диаметр кратера D (км)	Диаметр ударника d (м)	Энергия E (Мт ТНТ)	Частота падения $N_1 \cdot 10^{-6}$ лет $^{-1}$	Средний импактный интервал (лет)	Предполагаемая скорость падения v (км/с)	Число кратеров N (EDEIS)
0,025–0,05	5,0E+00	1,4E-04	9,5E+04	1,0E+01	2	21
0,050–0,10	8,0E+00	1,5E-03	2,7E+04	3,7E+01	4	24
0,100–0,20	1,3E+01	1,6E-02	7,9E+03	1,3E+02	6	28
0,200–0,40	2,3E+01	1,7E-01	3,0E+03	3,4E+02	8	42
0,400–0,80	4,3E+01	1,8E+00	8,1E+02	1,2E+03	10	46
0,800–1,60	8,4E+01	1,9E+01	3,0E+02	3,3E+03	12	69
1,600–3,20	1,7E+02	2,0E+02	1,2E+02	8,5E+03	14	107
3,200–6,40	2,5E+02	8,6E+02	3,5E+01	2,8E+04	16	128
6,400–12,80	5,0E+02	9,1E+03	9,4E+00	1,1E+05	18	136
12,800–25,60	1,1E+03	9,6E+04	1,7E+00	5,8E+05	18	101
25,600–51,20	2,4E+03	1,0E+06	2,6E-01	3,8E+06	18	61
51,200–102,40	5,3E+03	1,1E+07	5,0E-02	2,0E+07	18	47
102,400–204,80	1,2E+04	1,1E+08	7,0E-03	1,4E+08	18	26

поверхности Земли, поэтому плотность числа кратеров будет величиной, не зависящей от выбранного участка поверхности. Таким образом, реальное число структур по крайней мере в 4 раза больше числа наблюдаемых кратеров, так как площадь поверхности суши, на которой и обнаруживается основная масса структур, составляет $\sim 25\%$ от площади поверхности Земли (см. рис. 2, 3).

Чтобы получить явное выражение для скорости кратерообразования из (2), используем эмпирическое соотношение для времени релаксации кратера, полученное в [18, 19] на основе статистического анализа характеристик (диаметр, возраст) достоверных импактных структур Земли. Согласно [18, 19], время релаксации T (год) зависит от его диаметра D (м) следующим образом: $T \approx D^2$. Учитывая вышесказанное, из соотношения (2) при $t = T$ можно получить выражение для скорости кратерообразования N_1 :

$$N_1 = K_N \times N \times D^{-2}, \quad (3)$$

где $K_N = 4/(1 - \exp(-1)) \approx 6,35$ (м 2 год $^{-1}$) — коэффициент, не зависящий от диаметра кратера D и отражающий степень неполноты существующих данных об импактных структурах Земли и эрозию, N — число обнаруженных кратеров диаметра D по данным EDEIS [30]. Будем использовать (3) в дальнейших расчетах оценки частоты падения (табл. 1) в диапазоне диаметров кратеров от 0,025 до 200 км.

Рассмотрим зависимость частоты падений от диаметра кратера для структур с различной достоверностью V : $V = 4$, $V = 4 - 3$, $V = 4 - 2$. Результаты представлены на рис. 5, на котором показано, что с увеличением количества структур кривая становится более гладкой, а значения N_1 возрастают. Наибольшие количественные отличия имеют место в диапазоне диаметров кратеров 200 м — 2 км. Так, при $D = 1,2$ км N_1 увеличивается на порядок: $N_1 = 30$ при $V = 4$, $N_1 = 300$ при $V = 4 - 2$.

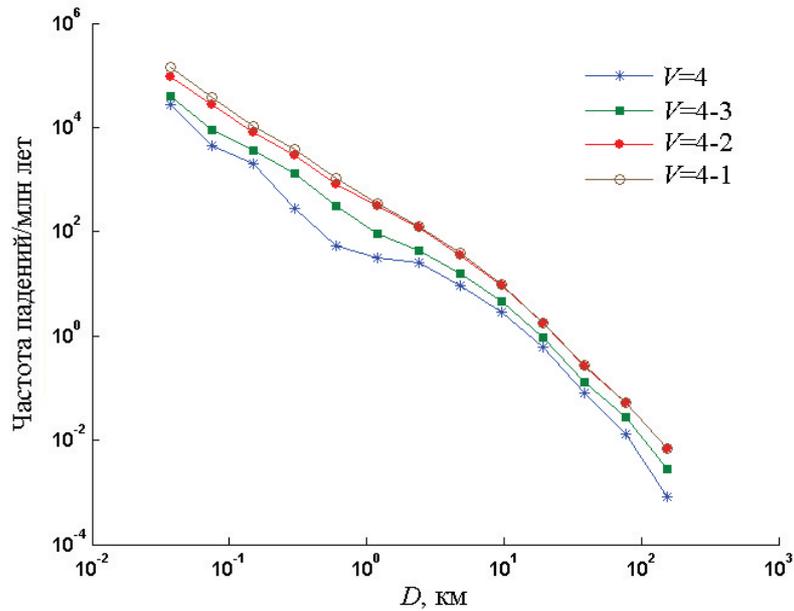


Рис. 5. Частота падений астероидов за 1 млн лет в зависимости от диаметра кратера для различных значений индекса достоверности V (по данным EDEIS [30])

Масштабы катастрофических последствий от падений космических тел на Землю характеризуются величиной выделившейся энергии, которая определяется кинетической энергией ударника. Для ее расчета будем использовать эмпирическое выражение, которое было предложено Ю. Шумейкером в работе [22]:

$$E = K\rho_1 D^{3,4}, \quad (4)$$

где E — кинетическая энергия ударника перед столкновением в килотоннах тротилового эквивалента ($1 \text{ кт ТНТ} = 4,184 \times 10^{12} \text{ Дж}$), D — диаметр наблюдаемого кратера (км), ρ_1 — плотность вещества мишени (горных пород Земли) в кг/м^3 . Коэффициент пропорциональности K вычисляется из соотношения: $K = (c_f/D_0)^{3,4} \rho_0^{-1}$, где ρ_0 — плотность горных пород, принимаемая равной плотности пород на испытательном полигоне в Неваде ($\rho_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$), $c_f = 1$ для кратеров диаметром менее 4 км; $c_f = 0,77$ для кратеров диаметром более 4 км (коэффициент, определяющий отношение размера исходного (переходного) кратера к наблюдаемому), $D_0 = 0,074 \text{ км/кт ТНТ}^{1/3,4}$ — эмпирическая константа. В результате получим значения коэффициента K размерности $(\text{м}^3/\text{кг})(\text{кт ТНТ})(\text{км})^{-3,4}$: $K = 3,8845$ при $D < 4$ и $K = 1,5974$ при $D \geq 4$. Будем полагать в (4) $\rho_1 = 2600 \text{ кг/м}^3$.

Для определения зависимости частоты падений небесных тел от диаметра кратера D используем базу данных EDEIS [30]. Будем рассматривать значения D в диапазоне от 0,025 до 200 км. Проведем выборку импактных структур с индексом достоверности $V = 2 - 4$ (достоверные, вероятные и возможные, всего 900) по диаметру таким образом, чтобы диапазон изменений кинетической энергии E (Мт ТНТ) каждой выборки менялся в пределах одного порядка: $E_L \leq E < E_R$, где $E_R = 10E_L$. Так как $E \sim D^{3,4}$, согласно (4), получаем соответствующие интервалы для диаметра кратеров: $D_R = 1,97 \times D_L \approx 2D_L$.

Кроме того, диаметр сферического ударника d (м) можно определить из соотношения $E = \pi d^3 \rho v^2 / (12 \times 4,184 \times 10^{12})$ при заданных значениях плотности ρ (кг/м^3), скорости падения v (м/с^2) и кинетической энергии E с учетом величины тротилового эквивалента

(кт ТНТ). Будем полагать, что плотность ударника $\rho = 3500 \text{ кг/м}^3$ (каменный метеорит), а скорость падения варьируется в зависимости от энергии удара E (кт ТНТ) от $v_{\min} = 2 \text{ км/с}^2$ при $E \sim 10^{-4}$ до $v_{\max} = 18 \text{ км/с}^2$ при $E > 10^3$ с шагом $v = 2 \text{ км/с}^2$ при возрастании E на порядок, поскольку при малых значениях энергии падающего тела велико влияние торможения в атмосфере [25].

Результаты расчетов представлены в табл. 1, в которой использованы следующие обозначения и формулы: диаметр кратера D — среднее значение в рассматриваемом интервале, энергия кратерообразования (4), частота падения (3), N — число кратеров в заданном интервале диаметров по данным EDEIS [30]. Атмосферными эффектами для малых ударников пренебрегаем (при реальных падениях ударники диаметром $d < 50 \text{ м}$, вероятно, сгорают в атмосфере).

Анализ результатов. В 1994 г. Д. Моррисон и др. [14] предложили следующую классифицицию последствий, являющихся результатом падения небесных тел на Землю в зависимости от диаметра ударника и кинетической энергии взрыва. Эта классификация в настоящее время широко используется для определения степени угрозы конкретных астероидов в случае их столкновения с Землей.

Падение болидов ($d < 50 \text{ м}$, $E < 10 \text{ Мт ТНТ}$). Атмосфера обеспечивает частичную защиту, сильный взрыв в верхней атмосфере не производит масштабных разрушений на поверхности Земли.

Взрыв типа Гунгусского ($d \sim 50 - 300 \text{ м}$, $E \sim 10^2 - 10^3 \text{ Мт ТНТ}$). Энергия взрыва достаточна для разрушения большого города.

Катастрофа регионального масштаба ($d \sim 300 \text{ м} - 2 \text{ км}$, $E \sim 2 \times 10^3 - 5 \times 10^5 \text{ Мт ТНТ}$). Гибель значительной части населения и разрушение инфраструктуры на территории отдельной страны. Возможны глобальные последствия (пожары, землетрясения, цунами).

Глобальная катастрофа ($d \sim 1 - 2 \text{ км}$, $E \sim 10^5 - 10^6 \text{ Мт ТНТ}$). Гибель значительной доли населения Земли, глобальный экологический ущерб, угрожающий существованию цивилизации.

Сверхглобальная катастрофа ($d > 4 \text{ км}$, $E > 10^7 \text{ Мт ТНТ}$). Массовое вымирание биоты.

Указанную классификацию падений по масштабу последствий можно применить к данным из табл. 1, используя линейную интерполяцию для получения оценок диаметра ударника d и среднего интервала между катастрофическими импактными воздействиями. Взрыв в верхней атмосфере: при $E \sim 10 \text{ Мт ТНТ}$ — $d \sim 60 \text{ м}$, средний интервал ~ 2 тыс. лет. Локальная катастрофа: при $E \sim 10^2 \text{ Мт ТНТ}$ — $d \sim 150 \text{ м}$, средний интервал ~ 8 тыс. лет. Региональная катастрофа: при $E \sim 2 \times 10^3 \text{ Мт ТНТ}$ — $d \sim 300 \text{ м}$, средний интервал ~ 40 тыс. лет. Глобальная катастрофа: при $E \sim 10^5 \text{ Мт ТНТ}$ — $d \sim 1 \text{ км}$, средний интервал ~ 600 тыс. лет. Сверхглобальная катастрофа: при $E \sim 10^7 \text{ Мт ТНТ}$ — $d \sim 5 \text{ км}$, средний интервал ~ 16 млн лет.

Сравним также результаты, приведенные в табл. 1 с данными других авторов по оценке частоты падений. На рис. 6 дано сравнение расчетных данных из табл. 1 с результатами, полученными в [25, 38, 39]. Для кратеров диаметром $D > 10 \text{ км}$ наблюдается близкое соответствие со всеми данными. По всему диапазону диаметров наилучшее согласие наблюдается с данными LPI [38].

В табл. 2 показано сравнение средних импактных интервалов падений астероидов, образующих кратер с диаметром $D = 1, 2 \text{ км}$, с использованием данных [25, 30, 38, 39].

Все предыдущие оценки частоты падений были получены в предположении, что падающее тело образует кратер на поверхности Земли. Это справедливо, однако, только для

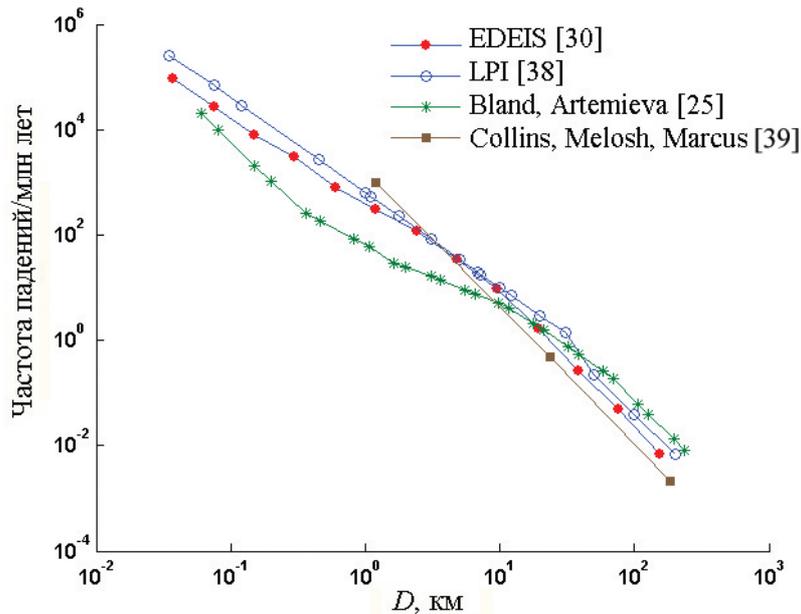


Рис. 6. Оценки частоты падения астероидов за 1 млн лет в зависимости от диаметра образуемого кратера по данным работ [25, 30, 38, 39]

Таблица 2

Сравнение средних импактных интервалов между падениями астероидов (лет), образующих кратер диаметром $D = 1, 2$ км, по различным источникам

Источник данных	Средний интервал между падениями (лет)
Bland, Artemieva [25]	4200
EDEIS [30]	3300
LPI [38]	2300
Collins, Melosh, Marcus [39]	1000

достаточно плотных тел — астероидов и их обломков. Другим классом небесных тел, угрожающих Земле, являются кометы, обладающие значительно меньшей плотностью, но имеющие подчас огромную массу. При взаимодействии кометы с земной атмосферой взрыв может происходить на значительной высоте, при этом может быть выделена огромная энергия, но кратер на поверхности Земли не образуется. В работе [17] получена зависимость относительного числа астероидов в общем потоке опасных космических тел в зависимости от энергии взрыва на основе астрономических наблюдений и математического моделирования движения комет и астероидов в атмосфере Земли (рис. 7). При энергии от 5 до 19 Мт кометы могут взрываться в нижних слоях атмосферы без образования кратера, при этом на расстоянии десятков километров от эпицентра взрыва могут произойти значительные разрушения. Согласно [17], в этом энергетическом диапазоне доля комет может составлять около 75 % от общего числа падений. С учетом этого оценка частоты падений опасных космических тел на Землю должна быть увеличена. Например, при энергии взрыва $E \sim 19$ Мт, что соответствует образованию кратера диаметром $D = 1, 2$ км, оценка должна быть увеличена в 4 раза и составит порядка 1200 событий за 1 млн лет, что соответствует среднему интервалу между падениями в 825 лет.

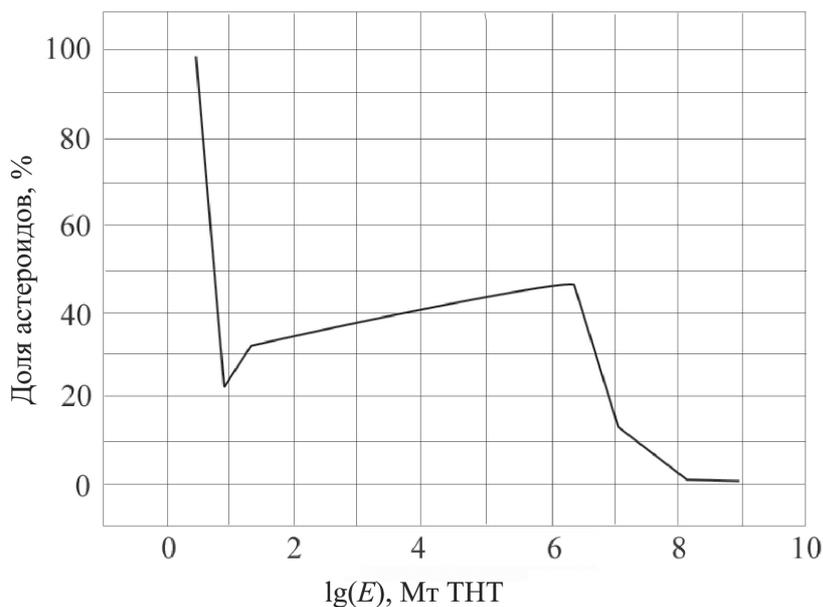


Рис. 7. Доля астероидов в общем потоке падающих на Землю тел в зависимости от энергии соударения E (Мт ТНТ) (по данным работы [17])

Заключение. Методика оценки частоты падений астероидов, представленная в данной работе, использует кратерную летопись Земли, учитывает процесс эрозии кратеров со временем и неполноту информации об импактных структурах. Включение в анализ не только достоверных, но и предполагаемых структур, импактное происхождение находится в процессе доказательства, значительно увеличивает количество данных, доступных для анализа. Оценки частоты импактных событий, полученные в данной работе, хорошо согласуются с ранее опубликованными работами во всем диапазоне диаметров кратеров (0,025–200 км).

Список литературы

1. THE SPACEGUARD survey report of the NASA International near-earth-object detection workshop. Ed. by Morrison D. NASA Publication. 1992. [Electron. resource]. <http://impact.arc.nasa.gov>.
2. КОМЕТ/АСТЕРОИД impacts and human society: An interdisciplinary approach. Ed. by Bobrowsky P., Rickman H. Berlin: Springer Verlag, 2007.
3. ПЕТРЕНКО В. Е., ЛЯПИДЕВСКАЯ З. А. Банк данных для импактных структур Земли // Труды ИВМиМГ СО РАН. Сер.: Матем. моделир. в геофиз. 1998. Вып. 7. С. 161–185.
4. СНАРМАН С. R. The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth // Earth and Planetary Sci. Let. 2004. Issue 1. P. 1–15. [Electron. resource]. <http://www.boulder.swri.edu/clark/crcepsl.pdf>.
5. 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. [Electron. resource]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103504001265>.
6. NASA. Near Earth Object Program. Impact Risk. Sentry Risk Table. 2013. [Electron. resource]. <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>.
7. NEUKUM G., IVANOV B. A. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from Lunar, terrestrial-planet, and aster-old cratering data // Hazards due to comets and asteroids / Ed. by T. Gehrels. Tucson: The Univ. of Arizona Press. 1994. P. 359–416.

8. IVANOV B. A., NEUKUM G., BOTTKE W. F., HARTMANN W. K. The comparison of size-frequency distributions of impact craters and asteroids and the planetary cratering rate // Asteroids III. Ed. by W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. Tucson: Univ. of Arizona Press, 2002. P. 89–101. [Electron. resource] <http://www.lpi.usra.edu/books/AsteroidsIII/pdf/3025.pdf>.
9. LE FEUVRE M., 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. [Electron. resource]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103511000947>.
10. HALLIDAY I., BLACKWELL A. T., GRIFFIN A. A. The flux of meteorites on the Earth's surface // Meteoritics. 1989. V. 24. P. 173–178.
11. HALLIDAY I., GRIFFIN A. A., BLACKWELL A. T. Detailed data for 259 fireballs from the Canadian camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids // Meteoritics & Planetary Science. 1996. V. 31. P. 185–217.
12. MORBIDELLI A., JEDICKE R., BOTTKE W. F., MICHEL P., TEDESCO E. F. From magnitudes to diameters: The albedo distribution of near-Earth objects and the Earth collision hazard // Icarus. 2002. V. 58. P. 329–343.
13. GRIEVE R. A. F., SHOEMAKER E. M. The record of past impacts on Earth // Hazards due to comets and asteroids / Ed. by T. Gehrels. Tucson: The Univ. of Arizona Press. 1994. P. 417–462.
14. MORRISON D., CHAPMAN C., SLOVIC P. The impact hazard // Hazards due to comets and asteroids / Ed. by T. Gehrels. Tucson: The Univ. of Arizona Press. 1994. P. 59–92.
15. STEWART S. A. Estimates of yet-to-find impact crater population on Earth // J. Geological Soc. 2011. V. 168. P. 1–14. [Electron. resource]. <http://ru.scribd.com/doc/95824986/Stewart-Estimates-of-Yet-To-Find-Impact-Crater-Population-on-Earth-JGSL168-2011-13>.
16. БОЛТЕНГАГЕН И. Л. Анализ кембриджского метеоритного каталога // Материалы Международной научно-технической конференции “Вторые ержановские чтения”. Казахстан, Актобе. 2007. [Электрон. ресурс]. http://www.boltengagen.narod.ru/articles/an_kem_met_kat.pdf.
17. МИКИША А. М., СМЕРНОВ М. А., БРОНШТЭН В. А., ЦИЦИН Ф. А. Угроза с неба: рок или случайность? Опасность столкновения Земли с астероидами, кометами и метеороидами / Общ. ред. А. А. Боярчука М.: Космосинформ, 1999.
18. ДАВИЖА А. И., ЗОТКИН И. Т., ФЕДЫНСКИЙ В. В. О распределении метеоритных кратеров на поверхности Земли // Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука. 1979. С. 117–125.
19. МАСАЙТИС В. Л., МАЩАК М. С., ЕЗЕРСКИЙ В. А. Продолжительность существования импактных морфоструктур в разных геологических условиях // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. 1985. № 2. С. 109–114.
20. SHOEMAKER E. M. Astronomically observable crater-forming projectile // Impact and explosion cratering / Ed. by D. J. Roddy, R. O. Pepin, R. B. Merrill. New York: Pergamon Press, 1977. P. 617–628. [Electron. resource]. <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1977iecp.symp..617S>.
21. GRIEVE R. A. F., DENCE M. R. The terrestrial cratering record II: The crater population rate // Icarus. 1979. V. 38. P. 230–242.
22. SHOEMAKER E. M. Asteroid and comet bombardment of the Earth // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1983. N. 11. P. 461–494. [Electron. resource]. <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1983AREPS..11..461S>.
23. HUGHES D. W. The cratering rate of planet Earth // J. Br. Interplanet. Soc. 1999. V. 52. P. 83.
24. HUGHES D. W. A new approach to the calculation of the cratering rate of the Earth over the last 125 ± 20 Myr. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc. 2000. V. 317. P. 429–437. [Electron. resource]. <http://mnras.oxfordjournals.org/content/317/2/429.full.pdf>.
25. BLAND P. A., ARTEMIEVA N. A. The rate of small impacts on Earth // Meteoritics and Planetary Science. 2006. V. 41, N 4. P. 607–631. [Electron. resource]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1945-5100.2006.tb00485.x/pdf>.

26. МАСАЙТИС В. Л., МАЩАК М. С. Районирование территории СССР по относительной оценке плотности вероятно сохранившихся астроблем // Метеоритика. 1984. № 43. С. 161–172.
27. ВАЛЬТЕР А. А., ГУРОВ Е. П. Установленная и предполагаемая распространенность взрывных метеоритных кратеров на Земле и их сохранность на Украинском щите / Метеоритные структуры на поверхности планет. М.: Наука. 1979. С. 126–148.
28. MOILANEN J. Impact structures of the world. 2010. [Electron. resource]. <http://www.somerikko.net/impacts/database.php>.
29. RAJMON D. Impact database. 2010. [Electron. resource]. <http://impacts.rajmon.cz/index.html>.
30. ЛЯПИДЕВСКАЯ З. А., ГУСЬЯКОВ В. К., АМЕЛИН И. И. Экспертная база данных по импактным структурам Земли / Expert database on the Earth impact structures (EDEIS) // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2011620863 от 07.12.2011, Роспатент. [Электрон. ресурс]. <http://tsun.sccc.ru/nh/impact.php>.
31. БРОНГУЛЕЕВ В. В., МАККАВЕЕВ А. Н., МАКАРЕНКО А. Г. Каталог астроблемовидных котловин Московского региона и некоторые результаты его анализа // Геоморфология. 2011. № 3. С. 32–44.
32. KISELEV A. K. The meteoritic nature of the calderas of the lakes Svetlojar and Nestiar // 40th Symposium ESLAB, 1st Intern. conf. on Impact Cratering in the Solar System, 2–8 May 2006.
33. ИЗОХ Э. П. Геологические данные о возрасте импактного кратера Жаманшин // 21-я Всесоюз. метеоритная конф., Москва, 24–26 апр. 1990 г. С. 83–84.
34. АЛЕКСЕЕВ А. С., ПЕТРЕНКО В. Е., ЗЕЙЛИК Б. С., ЛЯПИДЕВСКАЯ З. А., САЛОВ Г. И. Методики исследования кольцевых структур. Критерии идентификации космогенных кольцевых структур // Оценки частоты падения небесных тел на Землю, исследование возможности заблаговременного их обнаружения и изменения траекторий. Новосибирск: НТО ВЦ СО АН СССР, 1990.
35. АЛЕКСЕЕВ А. С., ПЕТРЕНКО В. Е., ЛЯПИДЕВСКАЯ З. А. Импактные структуры Земли: Банк данных, общие закономерности, вопросы диагностики и некоторые особенности // Оценки частоты падения небесных тел на Землю, исследование возможности заблаговременного их обнаружения и изменения траекторий. Новосибирск: НТО ВЦ СО АН СССР, 1991.
36. GUSIAKOV V. K., LYAPIDEVSKAYA Z. A. Expert database on the Earth impact structures // Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei. Proceedings of the Intern. conf. “Asteroid-Comet Hazard-2009” / Ed. by A. Finkelstein, W. Huebner, V. Shor. St. Petersburg: Nauka, 2010. P. 228–232. [Electron. resource]. http://tsun.sccc.ru/nh/papers/1%292010_Gusiakov,%20Lyapidevskaya_Expert%20database_ACH-2009.pdf.
37. КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ воздействия космических тел / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Институт динамики геосфер РАН. М.: Академкнига, 2005.
38. TARGET Earth: present, past, and future. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2012. [Electron. resource]. <http://www.lpi.usra.edu/publications/books/CB-954/chapter2.pdf>.
39. 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 // Meteoritics and Planetary Science. 2005. V. 40, N 6. P. 817–840. [Electron. resource]. <http://www.purdue.edu/impactearth/Content/pdf/Documentation.pdf>.

Амелин Иван Иванович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; тел.: (3832) 330-93-84;

Гусьяков Вячеслав Константинович — д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; тел.: (3832) 330-70-70;

Ляпидевская Зоя Андреевна — вед. программист Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; тел.: (3832) 330-95-23

Дата поступления — 9.09.2013