

«МЕТАТЕЛЬНОЕ КОПЬЕ» СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



БУСАРЕВ Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела исследований Луны и планет Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Автор и соавтор 100 научных работ

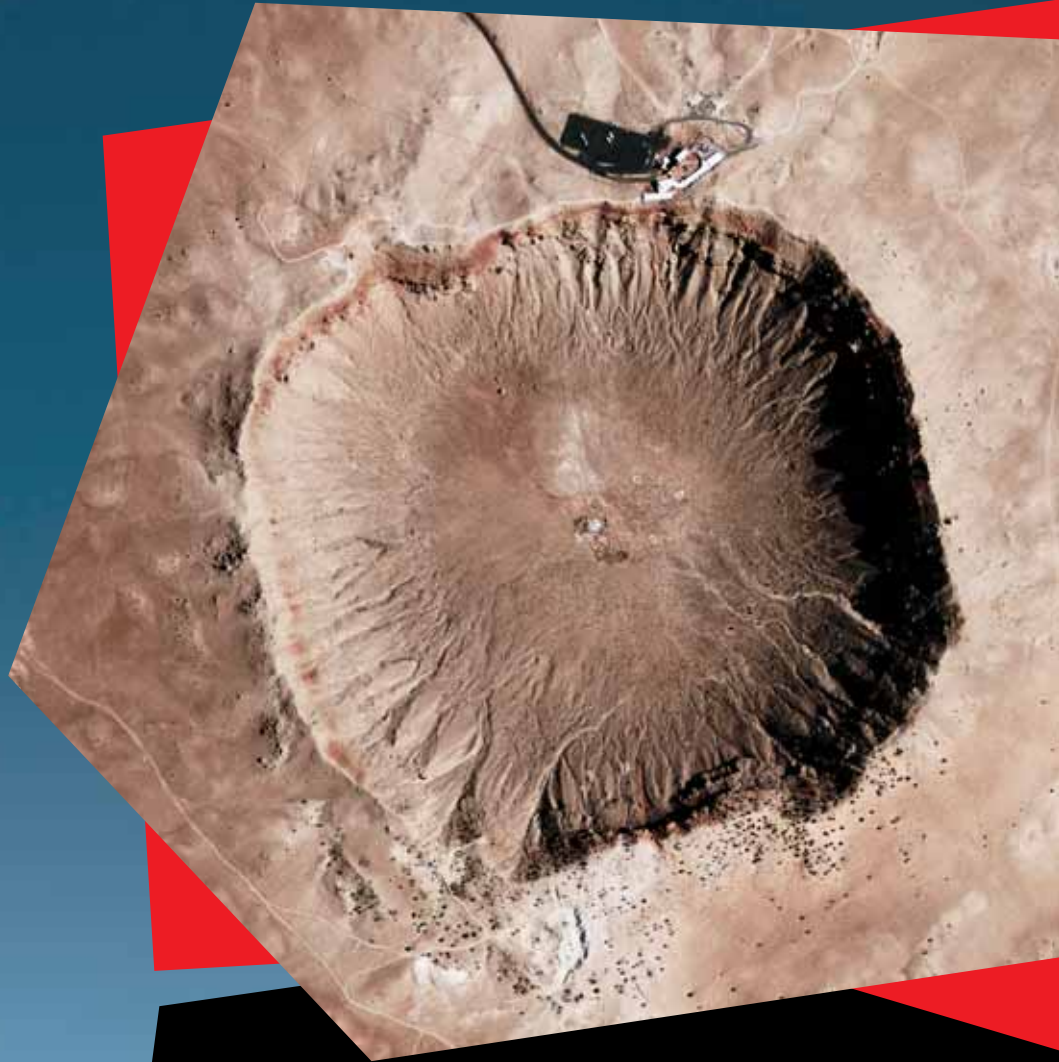
© В. В. Бусарев, 2013

В переводе с греческого «болидос» означает «метательное копье». Болидом принято называть очень яркий метеор – светящийся атмосферный след крупного метеороида, стремительно летящего к земной поверхности подобно падающему копью. Последним из таких удивительных небесных явлений стал получивший широчайшую известность Челябинский болид. Мощность взрыва этого метеороида была оценена примерно в половину мегатонны в тротиловом эквиваленте – в 20–30 раз мощнее атомной бомбы, уничтожившей Хиросиму! Метеорит, названный «Челябинск», стал самым большим среди всех небесных тел, упавших на Землю после знаменитого Тунгусского метеорита, падение которого произошло более ста лет назад

Челябинский болид наблюдался над Южным Уралом 15 февраля 2013 г. Фото М. Ахметвалеева
Предоставлено Челябинским государственным краеведческим музеем

Ключевые слова: метеориты, метеоры, метеороиды, столкновения небесных тел, перенос вещества в Солнечной системе.

Key words: meteorites, meteors, meteoroids, collisions of celestial bodies, transport of matter in the Solar System



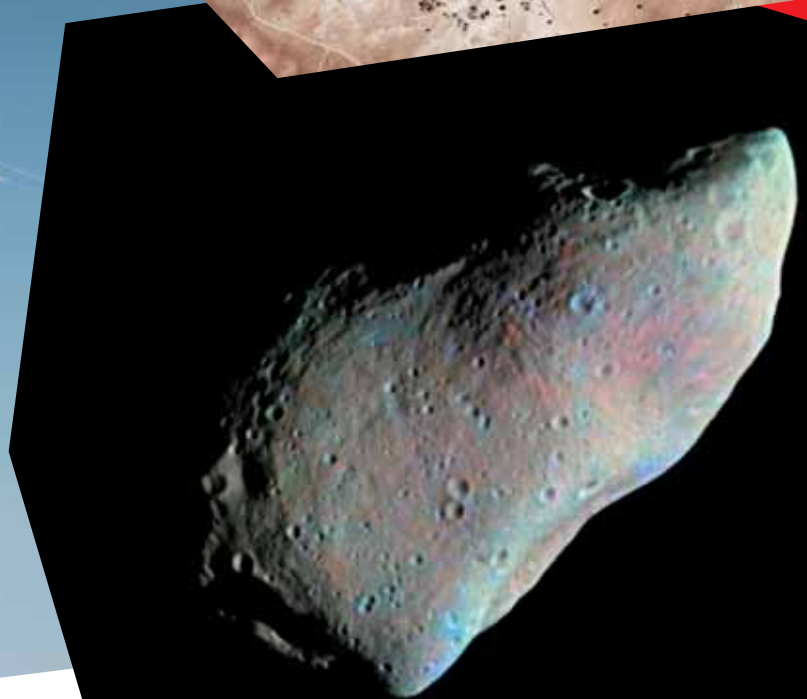
Метеориты (дословно «камни с неба») – это фрагменты небесных тел, астероидов и комет, упавших на Землю. При соударении внеземного тела размером 10—20 м с земной поверхностью образуется ударно-взрывной метеоритный кратер.

Справа вверху – кратер Бэрринджера (или Аризонский кратер) глубиной 180 м, образовавшийся при падении 50-метрового метеорита.

Вид с МКС (http://bigpicture.ru/wp-content/uploads/2009/06/i14_0000.jpg).

Кредит: NASA/USGS

Справа внизу – астероид 951 Гаспра длиной 19 км. Фото КА «Галилео» (НАСА), 1991 г. <http://www.solarviews.com/raw/ast/gaspra3.gif>
Кредит: NASA/USGS





Одним из очевидцев падения болида стал молодой челябинский фотограф Марат Ахметвалеев. 15 февраля 2013 г. ему удалось сделать уникальную серию снимков, на которых запечатлена последовательность событий (вспышек и взрывов) и траектория болида.

На фото – остаточный след болида на восходе Солнца.

Фото М. Ахметвалеева. Предоставлено Челябинским государственным краеведческим музеем





Челябинский метеороид вошел в земную атмосферу с восточного направления под малым углом к горизонту с огромной скоростью (около 18 км/с). Исходя из первоначальной массы и размеров небесного тела (около 9–10 тыс. т и 17 м соответственно), его плотность была оценена примерно в 3,5 г/см³, что соответствует плотностям каменных недифференцированных метеоритов (2,0–3,7 г/см³). Значительную силу взрыва этого сравнительно небольшого каменного тела можно объяснить его лавинообразным дроблением и последующим резким возрастанием силы торможения в земной атмосфере, благодаря чему большая часть кинетической энергии преобразовалась в тепловую.

Есть эмпирическое правило: при падениях и взрывах в атмосфере достаточно крупных тел на земную поверхность выпадает не более 10 % их первоначальной массы. С учетом начальной массы Челябинского метеороида можно допустить, что в этом случае на поверхность должно было выпасть несколько сотен тонн метеоритного вещества. Предполагаемый эллипс рассеяния метеорита (примерно 130 × 20 км) протянулся от точки южнее и западнее Челябинска до Златоуста, поэтому не исключено, что в этом огромном районе будут найдены и более крупные фрагменты.

Сразу по «горячим следам» были найдены частично оплавленные небольшие фрагменты метеоритного вещества общей массой около 3,5 кг. Первоначальный анализ состава этих осколков показал, что вещество метеорита представляет собой так называемый обыкновенный хондрит химической группы LL5. Аббревиатура LL означает, что в нем весьма мало (около 1,7 вес. %) железа и прочих металлов по сравнению с другими подобными метеоритами; цифра 5 показывает петрологический тип (самый высокий характеризуется цифрой 6), свидетельствующий о тепловом метаморфизме (изменении) вещества метеорита, которое произошло еще до его падения на Землю. Основные минералы, входящие в состав этого метеорита, – оливин, орто- и клинопироксен, плагиоклаз, хромит, троилит, железоникелевый сплав и апатит.

Сотрудник Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (Москва) и член Комитета по метеоритам к. г.-м. н. Д. Д. Бадюков, занимающийся изучением найденных осколков Челябинского метеорита, утверждает, что его минералогический и химический состав достаточно однороден; уточненная плотность метеорита – 3,2 г/см³. Возраст же метеорита составляет примерно 4,5 млрд лет, как и у всех обыкновенных хондритов.

На основе этих данных можно предположить, что метеорит образовался в Главном поясе астероидов, а размеры его родительского тела составляли несколько сотен километров. И еще один интересный факт: асте-

Возраст метеоритов оценивают по содержанию в их веществе долгоживущих радиоактивных изотопов и продуктов их распада. АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ метеоритов, являющихся фрагментами астероидов, составляет около 4,6 млрд лет.

Существует еще понятие КОСМИЧЕСКОГО ВОЗРАСТА метеоритов, который соответствует моменту разрушения их родительского тела и выделению метеоритов как самостоятельных космических объектов. Такой возраст определяется количеством накопленных в метеоритах под действием потоков частиц космогенных изотопов (¹⁰Be, ¹⁴C и др.). Диапазон космического возраста каменных и железных метеоритов широко варьирует, при этом максимум приходится на 10⁷–10⁸ лет.

Понятием ЗЕМНОЙ ВОЗРАСТ метеорита обозначается временной интервал между падением метеорита на земную поверхность и его находкой, за который метеоритное вещество подвергается эрозионным изменениям

роид, из которого произошел метеорит, очевидно, испытал сильный удар. По-видимому, с ним столкнулось другое массивное небесное тело, в результате чего его вещество стало рыхлым, а в многочисленных трещинах сохранился застывший ударный расплав.

Параметры болида продолжают до сих пор уточняться, для чего используются данные инфразвуковых, сейсмических, метеорологических станций, а также материалы многочисленных видеосъемок.

Один раз в столетие

События, подобные падению Челябинского болида, происходили и происходят на Земле повсеместно, иногда оставляя после себя заметные «следы» – кратеры.

Наиболее яркий пример такого рода – хорошо сохранившийся Аризонский метеоритный кратер – иначе, кратер Бэрринджера – с диаметром 1,2 км и глубиной 180 м, расположенный на севере штата Аризона (США). Геологические исследования и численное моделирование показали, что он образовался около 50 тыс. лет назад в результате удара о поверхность 50-метрового метеорита, весившего 300 тыс. т и летевшего со скоростью 12–17 км/с. Взрыв при этом был втрое более мощный, чем при падении Тунгусского тела, а сам метеорит практически полностью рассеялся и испарился, несмотря на свой преимущественно металлический состав. Общая масса космического вещества, падающего на Землю в течение года по разным оценкам достигает от 100 до 1000 т. Метеороиды входят в земную атмосферу со скоростью от 11,2 км/с (на «догоняющих» траекториях) до 72 км/с (на встречных траекториях) в любом направлении и в любое время суток и года.

На планетах без атмосферы (таких как Меркурий) либо с гораздо более разреженной атмосферой по сравнению с земной (например, на Марсе) метеоритные кратеры образуются при ударах значительно меньших по размеру и менее прочных тел, чем на Земле.

Вверху – метеоритные кратеры на поверхности Меркурия.

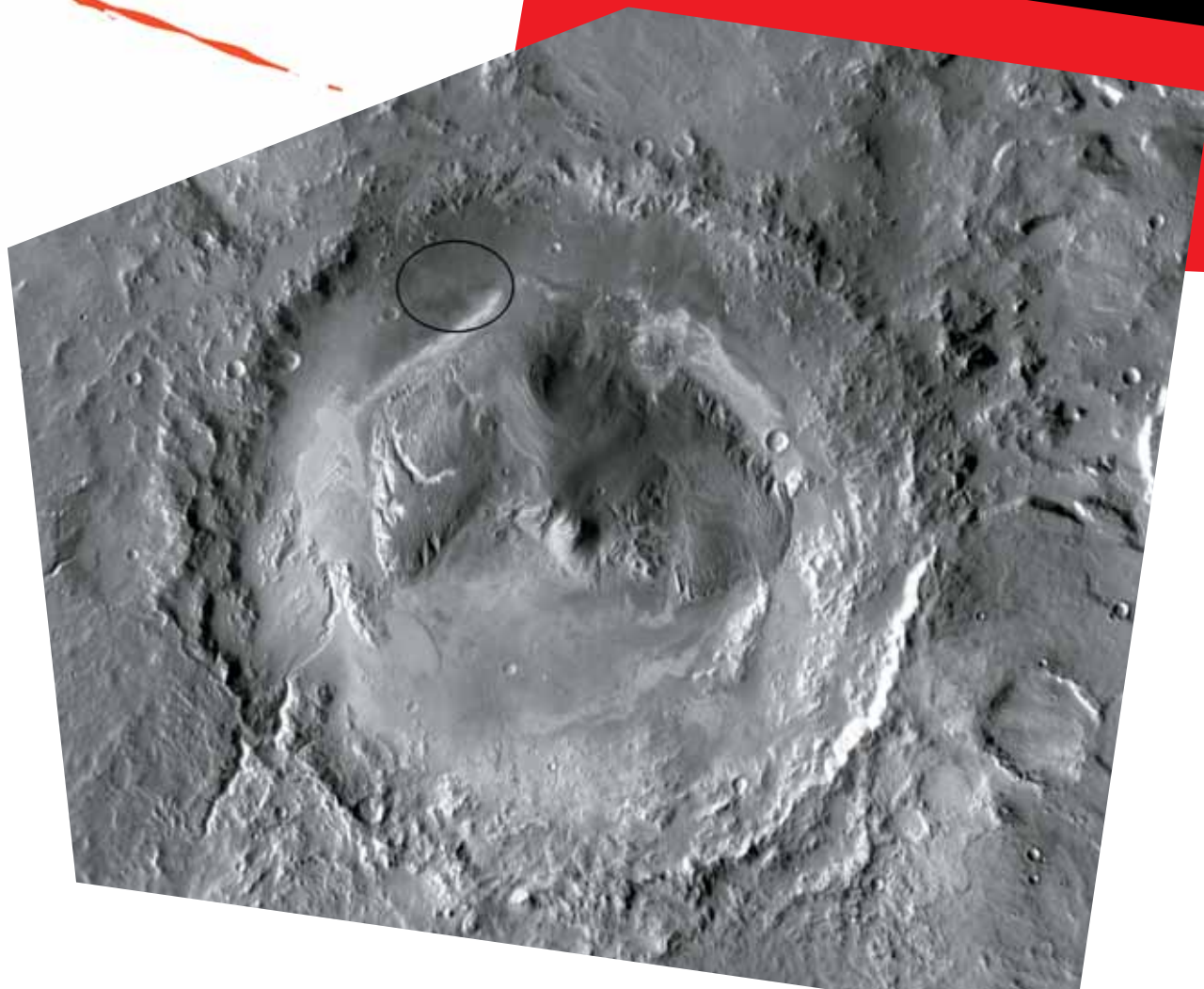
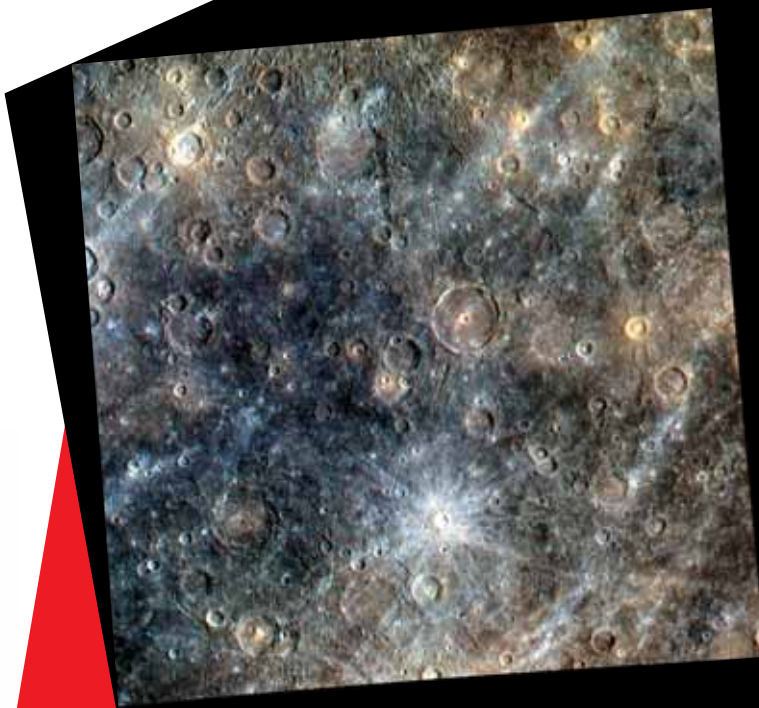
Фото КА «Мессенджер» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA14233.jpg>).

Кредит: НАСА/Johns Hopkins University/APL/Carnegie Institution for Science

Внизу – древний марсианский кратер Гэйл (154 км в диаметре) вблизи экватора в восточном полушарии Марса.

Фото КА «Марс Одиссей Орбитер», 2001 г. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA14290>)

Кредит: NASA/JPL-Caltech/Arizona State University





Первые метеоритные кратеры на спутнике нашей планеты были открыты еще в начале XVII в. Галилеем. На сегодня составлена подробная карта Луны, на которой отмечены все ее 5,2 тыс. кратеров, образовавшихся 4 млрд лет назад (справа).

Фото с <http://news.brown.edu/pressreleases/2010/09/moon>. Кредит: NASA/LRO/LOLA/GSFC/MIT/Brown University.

Слева – покрытое метеоритными кратерами западное полушарие Луны.

Фото с <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia00224>. Кредит: NASA/JPL

Если регистрировать все космические объекты размером 10^{-6} см, попадающие ежедневно в земную атмосферу, то их число составит 70 млн! Но только частицы более 10^{-2} см способны вызвать явление метеора, т. е. оставить в атмосфере светящийся след, который можно наблюдать визуально либо фотографическим или радиолокационным методами. А тела с массой более 1 кг уже порождают явление болида, который может завершиться взрывом и выпадением осколков. Среди падающего на Землю метеоритного вещества около 92 % составляют каменные метеориты, 6 % – железные и 2 % – железокремниевые.

Нужно упомянуть, что атмосфера является мощным газовым фильтром, предохраняющим земную поверхность от интенсивного потока падающих мелких тел. Возможность образования ударного кратера на поверхности Земли зависит от массы, размера, состава вещества и физического состояния достигающего ее космического тела. В целом установлена следующая закономерность: чем больше размер метеороидных тел, тем меньше в среднем частота их падений. Например, вероятность падения метеороида, подобного Челябин-

скому, оценивается как одно событие в 100 лет, а Тунгусского – уже в 1 тыс. лет. В ранний же период истории Земли эти вероятности были значительно более высокими.

Наибольшую опасность представляют столкновения Земли с крупными телами, такими как астероиды и ядра комет размером более 1 км, которые способны вызвать катастрофу с масштабом от регионального до глобального. По данным Центра малых планет Международного астрономического союза (IAU), на сегодняшний день обнаружено свыше 7 тыс. астероидов, сближающихся с Землей (они входят в группы Атонцев, Аполлонцев и Амурцев), из которых около 900 имеют диаметр более 1 км.

Положения этих астероидов могут быть рассчитаны на любой момент времени, однако их орбиты подвержены периодическим изменениям под влиянием гравитационных возмущений со стороны планет земной группы и поэтому нуждаются в постоянном уточнении.

Еще большим изменениям подвержены вытянутые орбиты периодических комет, появление же новых комет вообще непредсказуемо. Если говорить о телах

типа Челябинского метеорита, то их число в околоземном пространстве оценивается в 100 млн. В то же время технические возможности слежения за космическими «гостями» пока достаточно ограничены: за несколько суток до сближения с Землей можно обнаружить только тела размером не меньше 50 м, и то лишь в случае их достаточно высокой отражающей способности в солнечном свете.

Разрушительные последствия падения Челябинского метеорита вывели «астероидно-кометную опасность» из теоретических в число очевидных и насущных проблем, требующих практического решения. Речь идет о создании системы для своевременного обнаружения приближающихся к Земле космических тел размером свыше 10 м и осуществления мер по их уничтожению или отклонению с опасной траектории.

Кратеры земные и «небесные»

Можно предположить, что когда Галилео Галилей впервые в 1609 г. навел на Луну телескоп, то увидел множество кольцевых структур непонятной природы, хотя в своем сочинении «Звездный вестник» (1610) среди открытий, сделанных им с помощью телескопа, он упоминает только лунные горы. Понять происхождения лунных кратеров удалось лишь спустя три с половиной столетия.

Примечательно, что Парижская академия наук официально признала космический источник падающих с неба камней только в начале XIX в., хотя доказательства этого факта были получены и опубликованы некоторыми учеными (например, немецким физиком Э. Хладни и членом Лондонского королевского общества Э. Кингом) значительно раньше. После этого постепенно начало приходить понимание тех последствий, которые могут иметь падения метеоритов и более крупных тел на Землю, Луну и другие планеты. Что же касается лунных кратеров, то обсуждение их природы (вулканической или ударной) не прекращалось до середины XX в. Исследования лунной поверхности с помощью советских и американских космических аппаратов, а также пилотируемых экспедиций по программе «Аполлон» показали, что абсолютное большинство лунных кратеров являются ударными.

Нужно заметить, что термин «ударный» в данном случае не совсем точен. На поверхности безатмосферных небесных тел, таких как Луна, почти все спутники планет и астероиды, кратеры образуются при падениях тел, движущихся с космическими скоростями. В этом случае в момент «контакта» падающего тела с более протяженным объектом происходит не механический удар, а взрыв, который приводит к испарению, плавлению, переработке и выбросу из эпицентра взрыва значительного количества вещества как «мишени», так

и самого «ударника». С помощью экспериментального и теоретического моделирования было установлено, что величина этих выбросов определяется рядом параметров сталкивающихся тел: физических (скорость, масса, прочность и др.), физико-химических (состав вещества и его фазовое состояние) и геометрических (угол столкновения, размеры тел).

Несколько иначе происходит образование кратеров на планетах, имеющих атмосферу. Торможение крупного падающего тела в атмосфере приводит к частичной или полной потере и преобразованию его кинетической энергии в другие формы (ударную волну в газе и в самом теле, тепловое и световое излучение и т. п.) еще до его столкновения с поверхностью планеты. Поэтому на земной поверхности кратеры образуются только при падениях достаточно прочных (например, металлических) или больших тел, для которых атмосфера не является значительным препятствием. На поверхности Марса, имеющего примерно в сто раз более разреженную атмосферу, чем Земля, кратеры образуются при ударах значительно меньших по размеру и менее прочных тел.

Признание реальности потока падающих на Землю космических тел в начале XIX в. привело к целенаправленному поиску ударных образований на всех континентах. Но изучение первых найденных ударных кратеров – так называемых *астроблем*, было сложным делом, а его результаты – противоречивыми. Этим занимались, в первую очередь, геологи, поскольку именно они могли обнаружить необычные минералогические, геохимические и другие особенности этих образований на фоне земных горных пород.

На протяжении почти ста лет, начиная с 1827 г., предпринимались попытки выяснить происхождение группы из девяти кратеров Каали на о. Сааремаа (Эстония), самый крупный из которых имеет диаметр 110 м и глубину 22 м. Только в 1937 г. инженеру-геологу И. Рейнвальду удалось доказать их метеоритную природу благодаря обнаружению в двух кратерах осколков метеоритного железа.

Такой же драматической стала и история изучения Аризонского кратера. До начала XX в. считалось, что он является вулканическим. Однако в 1902 г. американский горный инженер Д. Бэрринджер, основываясь на многочисленных находках небольших фрагментов метеоритного железа на дне и за пределами вала кратера, предположил, что он имеет метеоритное происхождение. Бэрринджер потратил 26 последних лет своей жизни, безуспешно пытаясь найти крупный фрагмент этого метеорита на дне кратера с целью добычи никеля.

Лишь в 1940–1950-х гг., когда при геологической разведке и оценке других природных ресурсов стали широко применять аэрофотосъемку, выяснилось, что на поверхности земного шара имеется много округлых



Этот астероид 243 Ида (58 км длиной), как и все другие астероиды, хранит на своей поверхности следы всех процессов, происходивших в Солнечной системе, прежде всего – ударных.

Фото КА «Галилео» (НАСА), 1993 г.

(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA00135.jpg>).

Кредит: NASA/JPL-Caltech

геологических структур необычного строения. Их всестороннее исследование показало, что они представляют собой астроблемы – следы ударов космических тел.

В наши дни изучение крупномасштабной структуры известных и поиск новых астроблем проводится с помощью спектральной космической съемки. Общее число известных астроблем диаметром от 10 м до 340 км – около 200 (35 из них находятся на территории бывшего СССР). Их возраст имеет широкий диапазон: от 2,5 млрд лет до наших дней. Причем небольшие кратеры с размерами от десятков до сотен метров (их доля составляет около 15 %) не старше 1 млн лет.

«Дети» астероидов

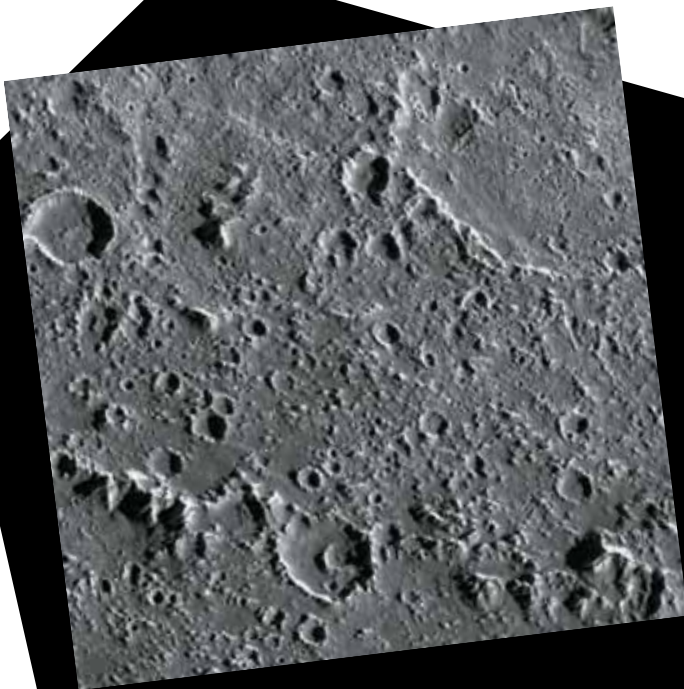
Широкомасштабные исследования Солнечной системы с помощью космических аппаратов, начатые во второй половине XX в., показали, что ударными кратерами покрыты не только Земля и Луна. Ударные структуры были обнаружены на всех известных твердых телах Солнечной системы. Их много на Марсе и безатмосферном Меркурии, они видны на всех космических снимках астероидов Главного пояса, расположенного между орбитами Марса и Юпитера, а также спутников планет.

Астероиды – небесные тела с размерами примерно от 50 м до нескольких сотен километров. С момента своего образования они остались почти в неизменном виде по сравнению с планетами и их спутниками, вещество

которых было существенно модифицировано под действием магматического плавления, дифференциации и других факторов. Поэтому именно астероиды хранят на своей поверхности следы всех процессов, происходивших в Солнечной системе, и прежде всего – ударных. Важными источниками такой «исторической» информации являются разные свойства астероидов: форма тела, строение поверхности, отражательная способность, вращение, размеры, масса, средняя плотность, параметры орбиты и т. д. Обобщение такой информации для большого количества тел позволяет изучить ранний этап формирования нашей планетной системы.

Следует заметить, что практически у всех астероидов неправильная форма сочетается с сильно кратерированной поверхностью. Прежде всего это означает, что такие астероиды являются фрагментами более крупных тел. Дробление этих родительских тел произошло, вероятно, при их взаимных столкновениях, вызванных, как это следует из современных динамических численных моделей, проникновением в Главный пояс астероидов крупных, движущихся с высокими скоростями протопланетных тел из зон формирования Юпитера и других планет земной группы.

С другой стороны, высокая кратерированность поверхности астероидов свидетельствует, что и после их образования интенсивный поток падающих на них тел не прекращался. Только самые крупные астероиды, такие как 1 Церера, который сейчас считается карликовой планетой, 2 Паллада и 4 Веста, по-видимому, избежали катастрофического разрушения и представляют собой «выжившие» родительские тела.



К настоящему времени такие ударные структуры, как метеоритные кратеры, были обнаружены на всех известных твердых телах Солнечной системы, и не только на планетах, но и на их спутниках.

Вверху – один из ближайших крупных спутников Сатурна – Мимас (208 × 197 × 191 км), поверхность которого испещрена метеоритными кратерами.

Фото КА «Кассини-Гюйгенс» (ЕКА-НАСА), 2010 г. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA12570.jpg>).

Кредит: NASA/JPL/Space Science Institute.

Внизу – метеоритные кратеры на поверхности Каллисто – второго по величине спутника Юпитера, открытого еще Галилеем.

Фото КА «Галилео», 1998 г. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA01629.jpg>). Кредит: NASA/JPL-Caltech

Измерения массы и точных размеров некоторых астероидов, сделанные с помощью сблизившихся с ними космических аппаратов, позволили оценить их среднюю плотность. Оказалось, что она заметно ниже типичной плотности слагающих их минералов и горных пород по сравнению с земными образцами-аналогами, что указывает на высокую пористость астероидов либо наличие в них внутренних пустот. Очевидно, что все перечисленные особенности астероидов – следствие их катастрофического происхождения и ударной эволюции.

Сейчас уже доказано, что метеориты являются в основном осколками астероидов. Скорость остывания метеоритного вещества определена по свойствам так называемых «видманштеттеновых фигур», возникающих при кристаллизации железоникелевого расплава в железных метеоритах и в мелких железных частицах в каменных метеоритах. Оказалось, что эта скорость соответствует темпам охлаждения недр тел с размерами от нескольких десятков до нескольких сотен километров, что совпадает с размерами астероидов. Основные типы метеоритов (каменные, включающие хондриты и ахондриты, железокремнистые и железные) по оптическим характеристикам соответствуют таксономическим (спектральным) типам астероидов.

Более того, обнаружены группы метеоритов, свойства которых практически совпадают с наблюдаемыми характеристиками конкретных небесных тел. Например, есть «лунные» метеориты, которые близки или идентичны доставленным на Землю лунным образцам. Найдены также «марсианские метеориты», а также метеориты, состоящие из вулканических горных пород, по свойствам соответствующих веществу астероида Веста.

Обнаружение таких метеоритных групп показывает, что при сильных ударах отдельные осколки планетных тел могут выбрасываться в космическое пространство и в итоге достигать земной поверхности. По существу, это механизм ударного обмена планетами веществом. Следует заметить, что практически без повреждений достигают земной поверхности мельчайшие метеоритные частицы размером $\sim 10^{-3}$ см и менее. По причине значительной величины отношения площади поверхности к объему у таких частиц, они эффективно тормозятся и охлаждаются в самых верхних слоях земной атмосферы. После чего происходит их свободное падение на земную поверхность.

По различным свойствам метеоритов (минералогическим, геохимическим, петрологическим, изотопным и др.) можно установить и проследить последовательность физико-химических процессов в их родительских телах.

Космические поставки

Столкновения небесных тел не всегда вызывают их катастрофические разрушения. Как следует из космогонических моделей, начальный период Солнечной системы был «конструктивным»: в результате низкоскоростных столкновений (по сути, слияний) многочисленных мелких тел образовались так называемые *планетезимали* – тела с широким диапазоном размеров. Когда эти объекты достигали нескольких километров в диаметре, они объединялись друг с другом в результате гравитационного притяжения. Благодаря такому процессу *аккреции* и шел рост протопланет. Вследствие накопления тепловой энергии при аккреции и распаде короткоживущих изотопов в достаточно больших (от 200 км и более) планетных зародышах началась первичная тепловая эволюция – плавление и дифференциация вещества.

Таким же «конструктивным» можно считать и процесс переноса вещества при столкновениях тел разного состава. Дело в том, что те же каменно-ледяные планетезимали могли образоваться в Солнечной системе за так называемой «границей конденсации водяного льда», т.е. на таком удалении от Солнца, где эти тела никогда не нагревались выше 0°C и где было возможно образование льда, преимущественно водяного. Кстати сказать, именно наличие большого количества ледяных планетезималей обеспечило быстрое формирование зародышей прото-Юпитера и других планет-гигантов.

Как следует из модели эволюции Солнечной системы, разработанной известными космогонистами О. Ю. Шмидтом и В. С. Сафроновым, температура прото-Земли и других планет земной группы в период их формирования была весьма высока. Это подтверждается многочисленными геохимическими и минералогическими исследованиями состава древнейших горных пород.

При магматической эволюции и дифференциации Земля должна была потерять практически всю «летучую» часть своего состава, если полагать, что исходным материалом было вещество типа хондритов или углестых хондритов. Еще одно катастрофическое событие, которое могло привести к полной потере Землей летучих компонентов, – это ударное формирование Луны из тела Земли в результате столкновения с ней гигантского протопланетного тела размером с Марс. И совпадение изотопных соотношений в земном и лунном веществе указывает на справедливость именно этого варианта происхождения Луны.

Логическим следствием перечисленных теорий стала гипотеза, согласно которой ныне существующие атмосфера и гидросфера Земли образовались из вещества



Астероид 21 Лютеция (120 × 100 × 75 км) покрыт многочисленными метеоритными кратерами с пятнами темного вещества, спектральные характеристики которого соответствуют углистым хондритам.

Фото с КА «Розетта», 2010 г. (http://rosetta.esa.int/science-e-media/img/56/4_closest_approach-0-orig.jpg и <http://www.esa.int/ima>). Кредит: ESA

«ЗЕРНИСТЫЕ» МЕТЕОРИТЫ

Высокий интерес к недифференцированным каменным метеоритам – хондритам – объясняется тем, что они подверглись наименьшим тепловым изменениям при образовании. Название этих метеоритов связано с наличием в них множества небольших овальных образований (хондр, от древнегреч. «зерно») с размерами от 0,5 до нескольких миллиметров. Хондры состоят из оливина, пироксена, плагиоклаза и других высокотемпературных минералов с температурами кристаллизации 1500—2000 °С и окружены так называемой матрицей.

Хондриты подразделяются на обыкновенные и углистые (темного цвета). У обыкновенных хондритов матрица состоит примерно из тех же минералов, что и хондры. В то же время матрица углистых хондритов состоит в основном (до 90 вес. %) из низкотемпературных гидросиликатов типа серпентинов, хлоритов и других минералов с большим (до 1–22 вес. %) содержанием связанной воды. Имеется также особая группа углистых хондритов, состоящих из одной матрицы, вещество которых никогда не нагревалось выше 100—200 °С.

Углистые хондриты обладают рядом других необычных свойств. Так, их низкотемпературная матрица содержит до нескольких процентов углерода в форме сложных углеводородных соединений, вплоть до спиртов и аминокислот. Место и условия возникновения этих соединений пока точно не установлены, однако можно утверждать, что гидросиликаты в углистых хондритах образовались благодаря раннему внутреннему разогреву родительских тел метеоритов, т. е. астероидов, благодаря энергетическому источнику в виде ^{26}Al (с периодом полураспада 0,72 млн лет) и других короткоживущих изотопов. В ряде каменных метеоритов, включая известный Альенде, обнаруженный в 1969 г. в Мексике, был найден в значительном количестве дочерний изотоп $^{26}\text{Al} - ^{26}\text{Mg}$



Крупные каменно-ледяные протопланетные тела, возникшие в зоне роста Юпитера, подверглись ранней тепловой эволюции благодаря распаду содержащегося в них ^{26}Al и последующей водной дифференциации. Они стали своего рода химическими реакторами, где сформировались гидросиликаты и сложные органические соединения

падающих на нее космических тел (астероидов, ядер комет, метеоритов и космической пыли) после остывания поверхности планеты. Однако, согласно расчетам, поток самых мелких объектов (пыли и метеоритов) за всю земную историю был недостаточен для доставки той воды, которая содержится в земных океанах.

Основной объем воды и других летучих соединений мог попасть на Землю только при падениях более крупных тел – астероидов и (или) ядер комет, содержащих воду в замерзшем или связанном состоянии. Тем более что статистический анализ возраста и размеров кратеров на Луне подтверждает высокую интенсивность потока падающих крупных тел в начальный период существования системы Земля-Луна, т. е. около 4 млрд лет назад. Кроме того, из результатов численного моделирования следует, что при падении достаточно крупного тела некоторая его часть избегает нагревания до высоких температур и попадает на земную поверхность в неповрежденном виде (о чем, в частности, свидетельствуют и найденные фрагменты вещества Челябинского метеорита). Парадоксально, но факт: астероиды и кометы, на протяжении всего существования земной жизни угрожавшие ей уничтожением, вероятно, создали условия для ее возникновения.

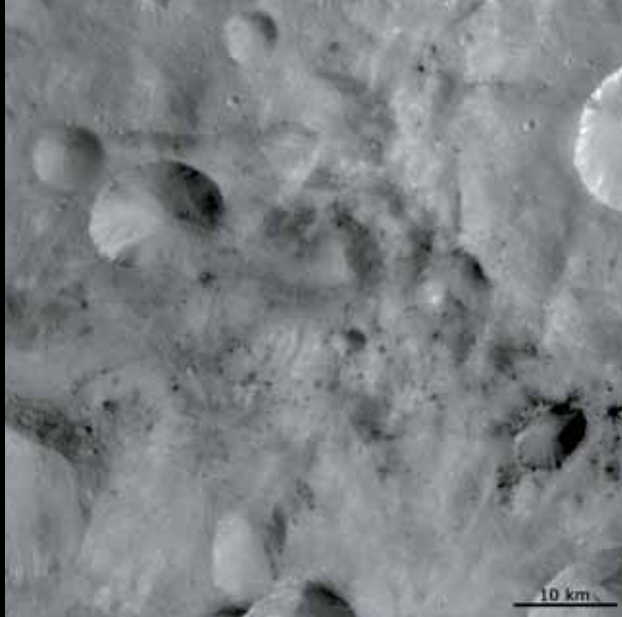
Благодаря падению ядер комет на земную поверхность могла попадать не только вода, но и весьма сложные органические соединения, возникшие в космосе под воздействием коротковолнового ультрафиолетового излучения и потоков частиц солнечного и космического происхождения.

Но и с самой водой на Земле не все так просто. Так, при изучении частиц межпланетной пыли было обнаружено, что изотопный состав кометной воды и океанической отличается. Это говорит, по крайней мере, о том, что «кометный» источник воды нельзя считать основным. В то же время изотопный состав «земной» воды и водных включений в углистых хондритах совпадает, что свидетельствует о том, что основная масса воды была доставлена на Землю именно этими небесными телами.

Этот вывод подтверждается следующими интересными результатами, полученными автором статьи. При спектральных наблюдениях астероидов типов «S», «M» и «V», которые, как и Земля, сформировались при высоких температурах, было обнаружено, что в состав большинства этих тел входят нетипичные для них гидросиликаты. Появление таких гидросиликатов можно также объяснить падением на астероиды примитивных тел углисто-хондритового состава.

Родословная астероидов

Необычные свойства углистых хондритов, сыгравшие такую важную роль в создании условий для возникновения жизни на Земле, обусловлены условиями их образования. Лабораторные спектры их отражения, характеризующие состав вещества, очень похожи на спектры отражения астероидов С-типа, на основании чего последние были признаны родительскими телами углистых хондритов. Согласно гипотезе автора, и углистые хондриты, и астероиды С-типа происходят



Судя по детальным изображениям астероида 4 Веста (диаметром около 530 км), полученным в 2011 г., он также покрыт многочисленными кратерами и небольшими участками с пятнами темного вещества, соответствующими по составу углистым хондритам. Фото с КА «Рассвет» (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA15083.jpg>) – слева. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/IA14712.jpg>) – внизу. Кредит: NASA/JPL-Caltech



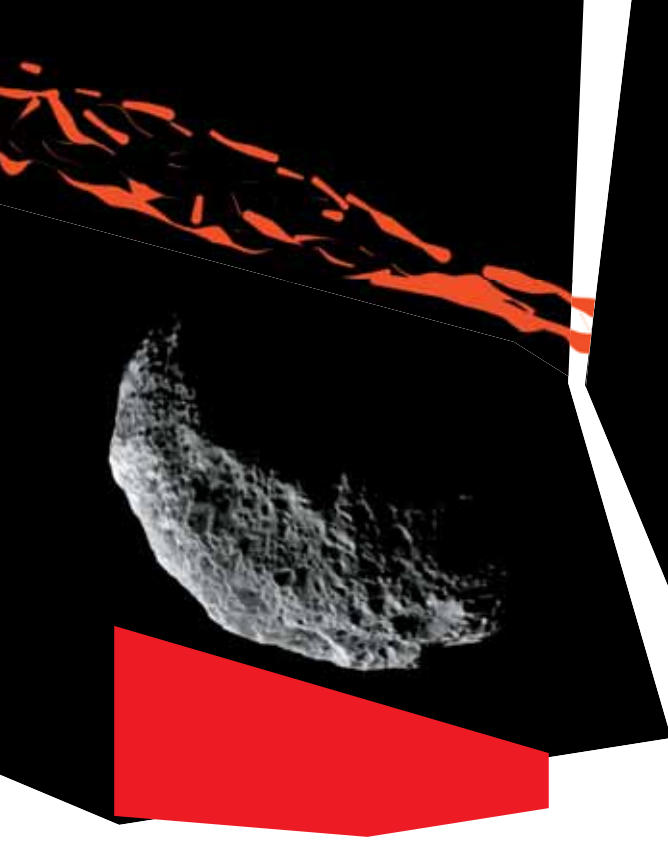
Снимок Дионы (563 × 561 × 560 км), одного из ближайших крупных спутников Сатурна. Изображение получено КА «Кассини-Гюйгенс» (ЕКА-НАСА) в 2006 г. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA11546>). Кредит: NASA/JPL/Space Science Institute

из одного источника – протопланетных тел из зоны формирования Юпитера.

Когда масса ядра Юпитера достигла нескольких масс Земли, процесс аккреции на него меньших по размеру протопланетных тел прекратился. Более того, эти тела стали выбрасываться далеко за пределы зоны формирования Юпитера, в том числе в находящийся по соседству Главный пояс астероидов (Сафронов, 1969). Поскольку, как уже говорилось, зона роста Юпитера располагалась за границей конденсации водяного

льда, все возникшие в ней протопланетные тела имели каменно-ледяной состав. Основываясь на составе вещества ядер комет и межпланетной пыли, можно предположить, что объемное содержание силикатов, льдов и органических соединений в них было примерно одинаковым.

В крупных (более 200 км) телах благодаря разогреву недр в результате распада ^{26}Al произошло плавление льда и образование внутреннего водного океана. Благодаря водной дифференциации в них сформировались

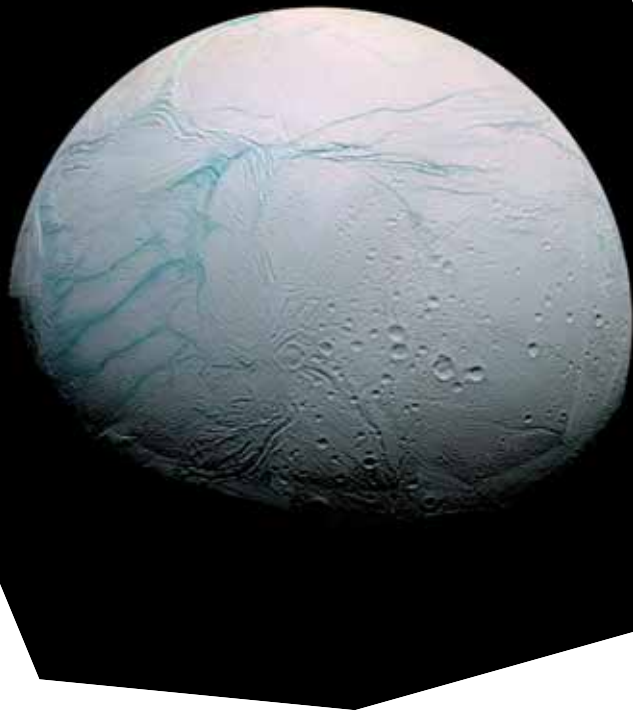


Типичная кратерированная поверхность Гипериона, одного из крупных ($180 \times 133 \times 103$ км) спутников Сатурна. Фото с КА «Кассини-Гюйгенс», 2010 г. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA12748>). Кредит: NASA/JPL/Space Science Institute

большие силикатно-органические ядра, радиус которых достигал $2/3$ радиуса самих тел. И если температура свободной воды всегда была близка к 4°C , то в ядрах она могла быть на порядок выше из-за более высокой относительной концентрации ^{26}Al . Эти ядра и стали, вероятно, своего рода химическими реакторами, где в течение 5–10 млн лет формировались гидросиликаты и сложные органические соединения, вплоть до того момента, когда ^{26}Al иссяк, а океан замерз.

Гравитационными возмущениями Юпитера протопланетные тела перебрасывались на вытянутые орбиты, которые не только пронизывали Главный пояс астероидов, но, по-видимому, достигали и планет земной группы. Из-за их большого (от 1–2 до 30 км/с) диапазона скоростей и эксцентриситетов орбит последствия их столкновений с родительскими телами астероидов были различны. Катастрофические столкновения при наибольших скоростях могли привести к выметанию из Главного пояса или полному дроблению абсолютного большинства таких тел. Но протопланетные тела, двигавшиеся с минимальными скоростями на незначительно вытянутых орбитах, после ряда неразрушающих столкновений, вероятно, так и остались в Главном поясе.

Важную роль должны были сыграть и различия в степени однородности и составе вещества каменно-



Темные пятна углистых хондритов, появление которых связано с ударными событиями, не обнаружены на некоторых небесных телах внешней части Солнечной системы.

Например, их нет на Энцеладе (вверху) и заведомо древней кратерированной ледяной поверхности Тефии (справа), крупнейших (диаметром около 1060 и 505 км, соответственно) ближайших спутников Сатурна.

Фото с КА «Кассини-Гюйгенс», 2009 г. (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA08280.jpg>) (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA11624>) Кредит: NASA/JPL/Space Science Institute

ледяных тел из зоны Юпитера и родительских тел астероидов. Более высокая механическая прочность и однородность последних могла при столкновениях стать причиной дробления протопланетных тел.

Таким образом, наиболее многочисленный класс С-астероидов Главного пояса составили, очевидно, крупные фрагменты разрушившихся протопланетных тел из зоны роста Юпитера. Еще одна группа представляет собой родительские тела астероидов, покрытые толстым слоем вещества типа углистых хондритов – результат падения на них мелких осколков раздробленных протопланетных тел.

Этот сценарий происхождения С-астероидов и углистых хондритов согласуется с идеей известного американского исследователя Г. Юри (1952 г.) относительно происхождения хондр в хондритах. По его мнению, хондры представляют собой капли расплавленного силикатного вещества, выброшенные в космическое



В то же время пятна такого темного материала, происхождение которого можно связать с ударными событиями, не обнаружены на некоторых небесных телах внешней части Солнечной системы. Например, вызывает удивление однородность светлой кратерированной (и, значит, древней) ледяной поверхности таких спутников Сатурна, как Энцелад и Тефия. Это — одна из загадок, которую еще предстоит разрешить.

Падение Челябинского метеорита стало для всех живущих на Земле очередным грозным напоминанием о существующей астероидно-кометной опасности, которая идет из космоса. В результате действия ударной волны, возникшей при взрыве метеороида, пострадало свыше тысячи человек — такое случилось впервые в истории цивилизованного человечества. И надо отдавать себе отчет в том, что по мере роста численности и плотности человеческой популяции такая угроза для населения Земли будет только возрастать.

Изучение метеоритов и ударных кратеров на земной поверхности позволило не только установить истинные причины подобных событий, но и выйти далеко за рамки земного мира. Эпоха космических полетов, начавшаяся в середине XX в., дала возможность увидеть поверхности других планетных тел и даже мысленно «заглянуть» в их недра. Сравнительное изучение разных небесных тел позволило построить теорию эволюции Солнечной системы, начиная с момента ее возникновения. И человечеству придется признать, что потенциально опасный для него поток космических объектов на Землю связан с вечным и неизбежным процессом — формированием и разрушением при столкновениях небесных тел.

пространство при столкновениях тел астероидных размеров, которые затвердели до своего падения на поверхность ближайших небесных тел.

Можно предположить, что углистые хондриты разных групп образовались при различной глубине ударной переработки исходного вещества: в этих группах последовательно уменьшается содержание связанной воды в форме гидросиликатов и нарастает относительное содержание хондр. Важно подчеркнуть, что так могли образоваться не только углистые, но и обыкновенные хондриты.

Судя по детальным изображениям астероида Веста, полученным в 2011 г. с помощью космического аппарата «Рассвет» (НАСА), он покрыт многочисленными кратерами с пятнами темного вещества, спектральные характеристики которого соответствуют углистым хондритам. Ранее с помощью космического корабля «Розетта» (ЕКА) была получена схожая информация относительно высокотемпературного астероида Лютеция.

Особенности расположения кратеров и связанных с ними выбросов вещества позволяют выдвинуть предположение, что в результате ударных событий, приведших к образованию кратеров на Весте и Лютеции, были вскрыты подповерхностные залежи древнего темного материала углисто-хондритового состава. Эти открытия являются прямым подтверждением существования интенсивного потока примитивных тел, направленного к внутренним планетам, в том числе на Землю, начало которого относится к периоду формирования Солнечной системы.

Литература

Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. М.: Наука, 1981.

Бусарев В. В. *Спектрофотометрия астероидов и ее приложения* / LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, Саарбрюккен, 2011.

Додд Р. Т. *Метеориты: Петрология и геохимия*. М.: Мир, 1986.

Иванов Б. А. *Распределение ударных кратеров и астероидов по размерам // Катастрофические воздействия космических тел* / Ред. Адушкин В. В., Немчинов И. В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 118—150.

Мелос Г. *Образование ударных кратеров: геологический процесс*. М.: Мир, 1994.

Сафронов В. С. *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет*. М.: Наука, 1969.