

ASTROBLEMES – STARRY WOUNDS OF THE EARTH

V. I. FEL'DMAN

The mechanism, geology and petrology of impact structures (astroblemes) are given and described. The classification of very unusual rocks – impactites – are considered. Some peculiarities of mineralogy and geochemistry of impactites are discussed.

Описаны механизм формирования, геология и петрология импактных (ударных) структур – астроблем. Рассмотрена классификация весьма необычных горных пород – импактитов. Обсуждены особенности их минералогии и геохимии.

АСТРОБЛЕМЫ – ЗВЕЗДНЫЕ РАНЫ ЗЕМЛИ

В. И. ФЕЛЬДМАН

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей истории человечества людей интересовали падающие с неба камни. Когда-то они считались вестниками богов и хранились в храмах как святыни. Уже в 77 году н.э. знаменитый римский естествоиспытатель Плиний Старший писал в своей 37-томной “Естественной истории”: “...но, что камни часто на землю падают, в этом никто сомневаться не будет”. Однако за историческое время наблюдались падения на Землю лишь сравнительно небольших обломков космических тел до первых метров поперечником и весом до 1,0–1,5 т. При этом образовывались небольшие (диаметром в первые десятки метров) воронки и лунки, как, например, при выпадении Сихотэ-Алинского железного дождя 12 февраля 1947 года в Приморье [1]. Более крупные воронки (размером в сотни метров) очень долго изучали геологи, прежде чем становилось ясно, что и они также представляют собой результат столкновения с поверхностью нашей планеты космических тел. Так, кратеры Каали на острове Сааремаа в Эстонии интриговали исследователей с 1827 до 1927 года (100 лет!), пока, наконец, эстонский геолог И.А. Рейнвальд не доказал их метеоритную природу. И лишь в 40–50-х годах нашего века, когда геологи начали широко применять аэрофотосъемку, выяснилось, что на поверхности земного шара имеется много округлых геологических структур необычного строения. Комплексное их изучение показало – это следы ударов космических тел. В 1960 году американский геолог Р. Дитц предложил называть их астроблемами, что в переводе с греческого означает “звездная рана”. Точность и образность этого термина обеспечили ему мгновенное и повсеместное признание.

В 1998 году число достоверно установленных астроблем превысило 200 (в том числе 20 из них в России), и ежегодно выявляется 2–5 новых. Размеры метеоритных кратеров различны – от 10–30 м до 340 км. Так же сильно колеблется и время их образования – от 2,5 млрд лет назад до наших дней. При этом небольшие (измеряемые десятками и сотнями метров) кратеры (их около 15%) относятся к молодым образованиям с возрастом не более 1 млн лет. Причина этого – быстрая эрозия поверхности планеты, приводящая к уничтожению мелких структур. Наоборот, крупные астроблемы диаметром в десятки и сотни километров имеют возрасты, измеряемые

десятками и сотнями миллионов лет (табл. 1). Распределение астроблем по поверхности Земли носит случайный характер. Больше всего их в восточной части Северной Америки и Европе (рис. 1), то есть в геологически наиболее изученных районах земного шара. Повышение интенсивности геологических работ быстро увеличивает количество достоверно установленных астроблем.

Таблица 1. Возраст некоторых крупных астроблем

Название	Диаметр, км	Возраст, млн лет
Вредефорт (ЮАР)	335	2000 ± 50
Маникуаган (Канада)	100	212 ± 2
Мороквенг (ЮАР)	340	145,5 ± 0,75
Попигай (Россия)	100	35,7 ± 2
Пучеж-Катунки (Россия)	80	175 ± 3
Садбери (Канада)	200	1850 ± 50
Чиксулуб (Мексика)	180	65,2 ± 4
Экремен (Австралия)	160	Около 590

Сравнение поверхности Земли с космическими снимками Луны (рис. 2) или Меркурия без труда позволяет увидеть, что на них кольцевых импактных структур гораздо больше. Считается, что причиной этого является раннее (3,8–3,9 млрд лет назад) прекращение активного развития этих планет, отсутствие у них атмосферы и гидросферы, связанных с ними экзогенных геологических процессов, приводящих к эродированию и/или захоронению ударных структур. Предполагается, что Земля на за-

ре своего существования (4,5–3,9 млрд лет назад) была похожа на Луну или Меркурий. Поэтому изучение астроблем и сопоставление результатов этих исследований с планетологическими данными позволяют лучше понять историю нашей планеты.

УДАРНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ

Форма и размеры астроблем, характер преобразования в них пород земной коры являются результатом ударного метаморфизма – процесса своеобразного, совершенно не похожего на другие геологические процессы, происходящие на Земле (и на других планетах Солнечной системы). Метаморфизм развивается при соударениях космических тел друг с другом. При этом в момент удара давление на горные породы достигает нескольких гигапаскалей, а температура измеряется десятками тысяч градусов. Такие параметры являются следствием реализации при ударе очень высоких энергий за крайне малое время.

Энергия соударения космического тела с поверхностью планеты зависит от его массы и скорости. Скорость сближения двух тел (для Земли и астероида) лежит в пределах от 11,2 до 72,8 км · с⁻¹. Минимальная величина определяется второй космической скоростью, а максимальная – векторной суммой второй космической скорости, скорости вращения Земли вокруг Солнца и скорости метеорного тела вдали от Земли. Мощная и плотная атмосфера тормозит космическое тело тем сильнее, чем больше его диаметр, так как оно перемещает впереди себя газ, сжимая его и постепенно затормаживаясь. Если уплотненная масса газа (*M*) достаточно

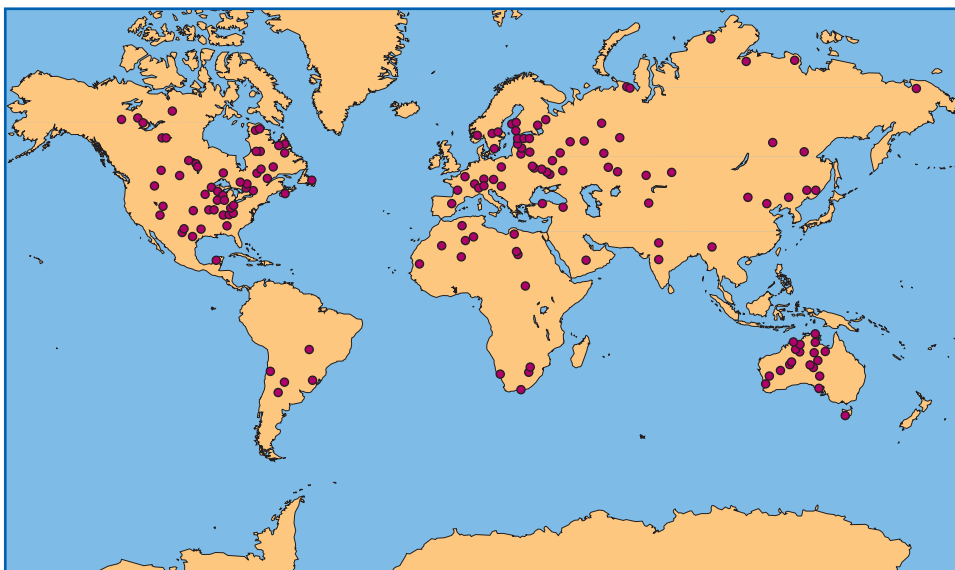


Рис. 1. Размещение астроблем на поверхности Земли. Видно, что наибольшее их количество выявлено в лучше изученных районах



Рис. 2. Поверхность Луны покрыта импактными кратерами разного размера – от гигантских бассейнов поперечником во многие сотни километров до мелких воронок в десятки метров и метры диаметром

велика (при $M_{\text{газа}} > 10M$ метеорита скорость движения падает на 90% и более), то скорость соударения приближается к нулю. В Намибии (Южная Африка) на поверхности земли лежит железный метеорит Хоба, вес которого около 60 т. Ни кратера, ни даже лунки при его падении не образовалось – метеорит приземлился как бы на воздушной подушке, скорость соударения была практически нулевой.

При скоростях соударения до $3\text{--}5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ образуются ударные кратеры (лунки, воронки, по размеру соответствующие метеориту-ударнику). Породы мишени дробятся и выбрасываются из воронки, распределяясь равномерно вокруг нее при вертикальном падении или вперед по направлению падения при ударе под углом. При больших скоростях соударения происходит взрыв.

Причинами взрыва являются резкое торможение космического тела при столкновении и переход кинетической энергии движущегося тела частично в механическую, частично в тепловую. Суммарная энергия, реализуемая в процессе соударения, может превышать $10^{19}\text{--}10^{23}$ Дж. Если сравнить эту величину с энергией катастрофических вулканических извержений ($1,44 \cdot 10^{20}$ Дж при извержении вулкана Тамбора в 1815 году или $1,81 \cdot 10^{19}$ Дж для вулкана Кракатау в 1883 году), то она примерно того же порядка. Однако результаты вулканического взрыва и импактного события совершенно несопоставимы. Это связано с тем, что в вулканическом процессе энергия расходуется не одномоментно, а в серии следующих друг за другом пароксизмов на протяжении $10^3\text{--}10^5$ с. В импактном процессе реализация кинетической энергии космического тела занимает

промежуток времени от нескольких миллиардных долей секунды до первых секунд (тем больше, чем больше суммарная энергия). Такая высокая плотность энергии определяет колоссальные градиенты параметров (давления и температуры) и как следствие – очень большие скорости протекания механических и тепловых процессов. Например, скорость механического деформирования пород в эндогенных геологических процессах составляет $10^{-16}\text{--}10^{-13} \text{ с}^{-1}$, а при импактных соударениях $10^3\text{--}10^4 \text{ с}^{-1}$, то есть на 17–20 порядков больше.

Резкое торможение космического тела при столкновении его с поверхностью планеты приводит к возникновению ударной волны сжатия, которая движется от точки столкновения вперед (в породах мишени – земной коры) и назад (в веществе ударника – космического тела). Сила сжатия при этом может составлять 100–300 ГПа, а время достижения максимальной величины сжатия измеряется первыми миллиардными долями секунды ($n \cdot 10^{-9} \text{ с}$). Сжатие естественно вызывает нагрев вещества до нескольких десятков тысяч градусов за столь же краткие промежутки времени. Чем больше общая энергия соударения, тем дольше вещество останется в сжатом состоянии (от нескольких наносекунд до первых секунд).

Ударное сжатие сменяется разрежением (разгрузкой), которое сопровождается механическим преобразованием породы, ее дроблением и адиабатическим охлаждением вещества. Эти процессы, как видно на рис. 3, происходят медленнее, чем рост давления и температуры. И самое главное, если давление в горных породах при разгрузке возвращается к исходному, то температура нет. Это связано с тем, что нагрев вещества при сжатии требует много больше энергии, чем сжатие (до 70% и более от общего ее энергии), а температура падает медленнее, чем давление. Поэтому послеподударная температура вещества в точке удара оказывается очень высокой, достигая $10\,000\text{--}15\,000^\circ\text{C}$.

Ударная волна от точки соударения движется во все стороны, и в первые моменты ее фронт имеет сферическую форму. Однако очень быстро эта форма искажается из-за неоднородности свойств пород

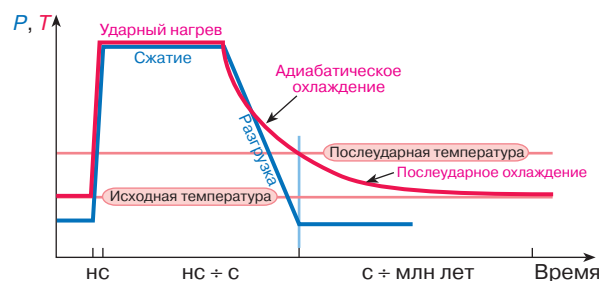


Рис. 3. Изменение ударного давления (P) и температуры (T) во время импактного события

мишени, а амплитуда ударной волны падает до 0,001 ГПа и менее на краю кратера. Механическое и тепловое воздействие на породы мишени также быстро падает. Поэтому в образующемся метеоритном кратере в центре (у точки удара) возникает зона испарения вещества (где породы нагреваются до многих тысяч градусов), затем располагается зона плавления вещества (при нагреве 1500°C и выше) и, наконец, зона дробления пород (в которой нагрев не превышает десятков – первых сотен градусов). Продукты дробления, плавления и испарения горных пород мишени (и, конечно, ударника) вовлекаются ударной волной в центробежное движение – вверх, в атмосферу планеты и в стороны, за пределы кратера. Расширение пара опережает движение расплава и твердых обломков и благодаря очень высокой скорости создает эффект взрыва. Следовательно, импактный процесс, начинаясь как удар, заканчивается как взрыв.

Описанная последовательность элементарных процессов характерна для любой точки в кратере, но в целом все эти процессы идут одновременно по всему кратеру – сразу, мгновенно (в человеческом масштабе времени) благодаря очень высокой скорости движения ударной волны, измеряемой километрами в секунду, от точки удара. После затухания ударной волны формирование астроблемы продолжается: падают выброшенные в атмосферу обломки, оседают борта воронки, деформируется ее дно, перемешиваются в движении обломки и расплав, кристаллизуется расплав, остывают породы кратера – импактиты. Это стадия переработки (модификации) метеоритного кратера. Она происходит уже намного медленнее. Если образование воронки занимает секунды (в самых крупных кратерах десятки секунд), то стадия модификации – это уже геологический процесс (по скорости протекания) и он растягивается на тысячи, десятки тысяч, сотни тысяч и миллионы лет.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИМПАКТНЫХ КРАТЕРОВ

Особенности геологического строения астроблем зависят от многих причин, среди которых главными являются две: энергия соударения и угол встречи ударника с мишенью. Энергия соударения определяет общие размеры метеоритного кратера и сложность его внутреннего строения. От угла встречи зависит форма астроблемы в плане.

Большая часть метеоритных кратеров имеет в плане округлую форму (рис. 4), что свидетельствует о кругом (близком к вертикальному) движении ударника. Пологое падение приводит к появлению кратера, вытянутого по направлению падения ударника. При этом, чем меньше угол встречи при соударении, тем сильнее вытянут кратер. Рекордсменом в этом смысле являются кратеры Рио-Кварто в Аргентине, образовавшиеся примерно 10 000 лет назад. Самый



Рис. 4. Астроблема Шунак (Казахстан, Прибалхашье) имеет диаметр 2,5 км; время ее образования около 12 млн лет. Хорошо видны цокольный кольцевой вал и уплощенное дно, покрытое глинистыми озерными осадками третичного периода

крупный из них имеет длину 4,5 км и ширину 1,1 км при глубине всего 7–8 м. Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что в этом случае угол встречи был менее 9°.

Округлая воронка кратера окружена валом (рис. 5), который образован заданными пластами горных пород мишени (это цокольный вал), перекрытыми выброшенными при взрыве обломками пород (которые слагают насыпной вал). Часть обломков переносится взрывной волной еще дальше и дает шлейф закратерных выбросов, который постепенно (по мере удаления от центра кратера) становится все тоньше.

Небольшие (диаметром до 3–4 км, изредка больше) астроблемы имеют простую чашеобразную форму. Глубина у них обычно составляет около 1/3 диаметра, а отношение глубины воронки к диаметру – примерно 0,30–0,33. Это отношение является одним из признаков, позволяющих отличать импактные кратеры от вулканических (у которых оно обычно не менее 0,42). При больших диаметрах воронки в центре кратера возникает центральное поднятие (центральная горка), которое образуется благодаря упругой отдаче пород мишени в области максимального их сжатия (под точкой удара). При диаметрах воронки более 14–15 км появляются кольцевые поднятия. Иногда в кратере наблюдаются и центральное, и кольцевое поднятия одновременно. Отношение глубины к диаметру с увеличением поперечника быстро падает до 0,05–0,02, и полость астроблемы становится уплощенной. Под кратером располагается зона трещиноватости, которая постепенно затухает с глубиной.

Внутри кратера располагаются продукты взрыва (импактиты). Это обломки пород мишени, стекла, пемзы и другие производные импактного расплава, смесь дробленого и расплавленного материала. А сверху

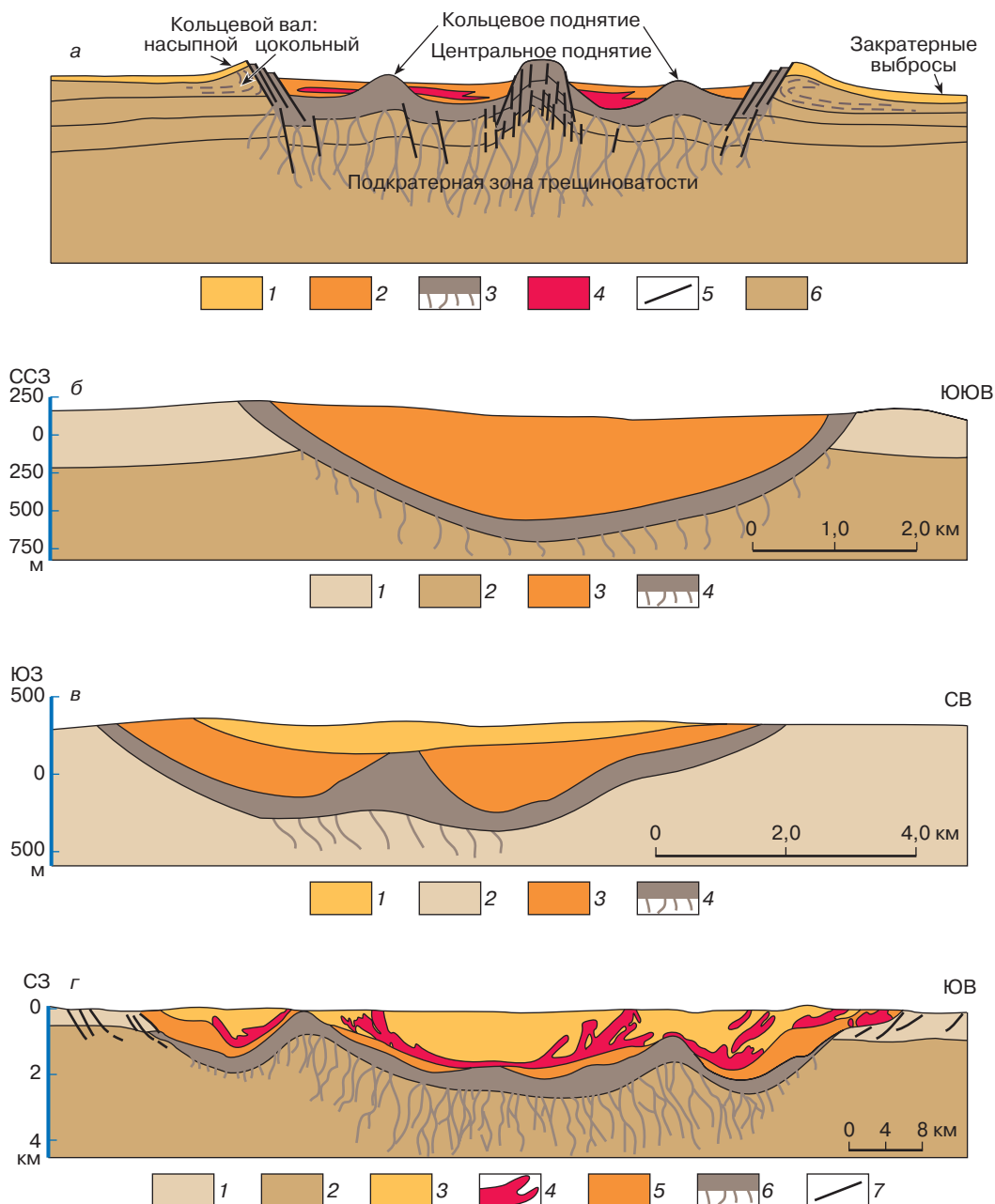


Рис. 5. Строение метеоритных кратеров (астроблем), разрез: *а* – общая схема. 1–4 – импактиты [1 – аллогенные брекчии закратерных выбросов; 2 – те же породы внутри астроблемы; 3 – аутигенные брекчии; 4 – расплавленные импактиты (тагамиты, стекла, шлаки)]; 5 – разрывные нарушения; *б* – породы мишени; *б* – Беенчиме – Салаатинская астроблема (Россия, Саха–Якутия; диаметр 8,0 км; время образования более 300 млн лет назад) – простой чашеобразный метеоритный кратер: 1 – осадочные породы чехла Сибирской платформы; 2 – метаморфические породы фундамента Сибирской платформы; 3 – аллогенные брекчии; 4 – аутигенные брекчии, переходящие в подкратерную зону трещиноватости; *в* – Карлинская астроблема (Россия, Поволжье; диаметр 12,0 км; время образования около 10 млн лет назад) – метеоритный кратер с центральным поднятием: 1 – плиоценовые глины (заполняющий комплекс); 2 – породы осадочного чехла Русской платформы (цокольный комплекс); 3 – аллогенные брекчии; 4 – аутигенные брекчии, переходящие в подкратерную зону трещиноватости; *г* – Полигайская астроблема (Россия, Саха–Якутия; диаметр около 100 км, время образования $35,7 \pm 0,2$ млн лет назад) – сложный метеоритный кратер с центральным и кольцевым поднятиями: 1 – породы чехла Сибирской платформы; 2 – породы кристаллического фундамента Сибирской платформы; 3 – зювиты; 4 – тагамиты; 5 – аллогенные брекчии; 6 – аутигенные брекчии, переходящие в подкратерную зону трещиноватости; 7 – разрывные нарушения; *б–г* по [5], схематизированы

обычно все перекрывают осадочные породы (отложения озера, заполнившего кратер после взрыва).

ИМПАКТИТЫ – ГОРНЫЕ ПОРОДЫ АСТРОБЛЕМ

Импактиты (от англ. *impekt* – удар) или, как их еще называют, породы ударного метаморфизма выделяются как самостоятельный тип горных пород наравне с осадочными, магматическими и метаморфическими. Это признание необычных условий их формирования. Дробление, плавление и испарение пород земной коры под действием ударной волны охватывают разные объемы материала в зависимости от состава и свойств пород мишени, особенностей их залегания, степени обводненности и других причин. При образовании астроблемы диаметром 10 км в граните отношение дробленого, расплавленного и испаренного вещества соответствует примерно 100 : 10 : 1. Если учесть возможность (и неизбежность) перемешивания этого материала, то станет понятным чрезвычайное разнообразие состава и облика пород ударного метаморфизма.

По международной классификации импактитов (1994 год) они делятся на три группы (по составу, строению и степени ударного метаморфизма):

1) импактированные породы – горные породы мишени, слабо преобразованные ударной волной и сохранившие благодаря этому свои характерные признаки;

2) расплавные породы – продукты застывания импактного расплава;

3) импактные брекчии – обломочные породы, сформированные без участия импактного расплава или с очень небольшим его количеством.

При застывании импактного расплава могут образовываться массивные породы, полностью сложенные стеклом, – импактные расплавные стекла. Они внешне похожи на вулканические стекла, но имеют специфические отличия от них, выявляющиеся при использовании современных лабораторных методов исследования (инфракрасной спектроскопии, ядерного и электронного парамагнитного резонанса и др.). Нередко можно встретить пористые разновидности стекол – импактные пемзы и шлаки. Неполикристаллические расплавные импактиты, содержащие кроме стекла также выросшие из расплава кристаллы, – тагамиты макроскопически похожи на излившиеся (эффузивные) вулканические породы и обычно содержат большую или меньшую примесь обломков импактированных пород мишени. Главная же масса дробленых пород, в разной степени преобразованных ударной волной, составляет импактные брекчии, которые очень разнообразны по размерам обломков – от тысячных долей миллиметра до сотен метров. Часть брекчий содержит импактное стекло (от 10 до 100%), такие брекчии называются зовитами и внешне напоминают вулканические туфы.

Расплавные импактиты слагают пластообразные тела, а также жилы и дайки, которые секут все виды импактитов, включая нередко и трещиноватые породы мишени, образующие цоколь астроблемы. Брекчии этого цоколя называются аутигенными (неперемещенными) брекчиями в отличие от брекчий насыпного вала, закратерных выбросов и брекчий, залегающих в кратере вместе с расплавными импактитами. Это аллогенные (перемещенные) брекчии.

Специфическими образованиями, связанными с импактными событиями, являются тектиты и так называемые катастрофные слои. Тектиты – это мелкие (размерами от первых миллиметров до нескольких сантиметров) стекла, застывшие из брызг импактного расплава, выброшенных в атмосферу на начальной стадии формирования астроблемы (в первые микросекунды) со скоростью, измеряемой многими километрами в секунду, и улетевшие от материнского кратера иногда на сотни или даже тысячи километров. Поверхность этих застеклованных капель имеет характерный аэродинамический узор, свидетельствующий о движении с очень высокими скоростями в горячепластичном состоянии через газовую среду.

Под катастрофными слоями понимают горизонты осадочных пород, как правило глин, с примесью продуктов ударного метаморфизма – мельчайшими обломками диаплектовых и высокобарических минералов, микросферами импактного стекла (размерами максимум в десятки микрон), очень редко мелкими обломочками метеоритов. Кроме того, для этих слоев характерны повышенные (иногда на порядок и больше) содержания Ir, Ni, Co, Os, изотопные аномалии He, Os, S, C, что указывает на примесь рассеянного метеоритного вещества. Все это говорит о том, что катастрофные слои являются отложениями выбросов в атмосферу тончайшего обломочного материала и пара, возникающих при образовании астроблем. Мощность таких слоев невелика (редко больше 1–2 см) и соответствует расчетному количеству сверхтонких (пылевых) выбросов для кратера диаметром более 100–150 км при условии, что этот материал более или менее равномерно распределится по поверхности Земли. Характерным примером такого образования является обнаруженный во многих десятках мест на всех континентах слой на границе мелового и палеогенового периодов (около 65 млн лет назад), это так называемая эпоха гибели динозавров. С мел-палеогеновой границей совпадает (по времени) образование четырех крупных кратеров: Чиксулуб в Мексике (диаметром 180 км), Кара в России (120 км), Болтышка на Украине (30 км), Мэнсон в США (35 км). Кроме того, этой границе соответствует возраст и нескольких астроблем небольшого размера.

Два последних типа импактных образований (тектиты и катастрофные слои) являются ярким

свидетельством того, что импактное событие не ограничено возникновением метеоритного кратера, но его воздействие на нашу планету гораздо шире и серьезнее.

ОСОБЕННОСТИ ИМПАКТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ

Ударный метаморфизм горных пород и минералов является специфическим процессом, резко отличающимся от любых других изучаемых геологией. Причина этого кроется в особенностях этого явления: очень высоких плотностях энергии и как следствие — огромной скорости механических и тепловых изменений вещества. Эти изменения в минералах объединяются термином “диаплектовые преобразования”, который произведен немецким петрологом В. фон Энгельхардтом и его коллегами от греческих слов *δια* (диа) — пере и *πλεκτοζ* (плектос) — витый, крученный. По мере увеличения ударной нагрузки в минералах можно наблюдать следующие, наиболее часто встречающиеся диаплектовые преобразования: трещины, планарные элементы, изотропизацию и ударно-термическое разложение [3, 4].

Трещины возникают при разгрузке минерала (после прохождения ударной волны) и характеризуются закономерной ориентировкой и высокой частотой (последнее отличает их от трещин спайности). Ориентированные трещины появляются даже в минералах, не обладающих спайностью (например, в гранатах). Планарные элементы в отличие от трещин являются закрытыми структурами, формирующимися при скольжении блоков кристаллической решетки минерала друг относительно друга в условиях ударного сжатия. При этом в одном зерне кварца, например, может наблюдаться 3–5 и более разноориентированных систем планарных элементов одновременно. Изотропизация является оптическим проявлением аморфизации вещества. Это результат сверхтонкого дробления кристалла ударной волной (до микроблоков менее 10 нм в поперечнике), благодаря чему вещество становится рентгеноаморфным (превращается в диаплектовое стекло). Диаплектовые стекла характерны для минералов с высокой пространственной однородностью кристаллической решетки: кварца, полевых шпатов, кордиерита. Минералы же с неоднородной решеткой (слоистые, ленточные и т.п.) испытывают ударно-термическое разложение и замещаются высокотемпературными полиминеральными агрегатами. Например, по роговой обманке возникает смесь микронных зерен высококальциевого плагиоклаза, пироксена (одного или двух) и магнетита, по гранату — смесь санидина, высокоглиноземистого гиперстена и герцинита ($\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$) и т.д.

Особенности диаплектовых изменений позволяют определять ударную нагрузку и послепударную температуру, испытанные минералом при импактном событии. Сейчас для этого имеются три экспе-

риментально обоснованных геобарометра: кварцевый, двуполевошпатовый и клинопироксеновый. Диаплектовые преобразования охватывают интервал ударных давлений 10–60 ГПа для кварца и полевых шпатов и до 70–80 ГПа для таких минералов, как оливины и пироксены. При более высоких нагрузках начинается плавление вещества.

Для некоторых минералов в импактиках выявлены высокобарические полиморфные модификации. Например, кварц при ударных нагрузках 12–15 ГПа переходит в коэсит и стишовит; оливин при $P_{\text{уд}} > 30$ ГПа — в рингвудит (оливин со структурой шпинели); клинопироксен при тех же условиях — в меджорит (пироксен со структурой граната); графит в интервале 35–50 ГПа — в алмаз (кубический С) и лонсдейлит (гексагональный С) и т.д.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ ИМПАКТИТОВ

Химический состав импактитов определяется составом пород мишени и поэтому колеблется в широких пределах. Например, содержание SiO_2 может быть любым — от почти нулевого (при образовании астроблемы в известняках) до близкого к 100% (если мишень сложена кварцитами или кварцевыми песками). Сильно меняются от кратера к кратеру количества и других компонентов. В составе расплавных импактитов отражаются еще два важных процесса: селективное испарение некоторых элементов (прежде всего щелочей и железа) и примесь метеоритного вещества [4].

Метеоритный материал присутствует в астроблемах в трех формах: в виде обломков метеорита, в мелких ($n10$ – $n100$ мкм) фрагментах переплавленного метеоритного вещества и в форме геохимического рассеяния его в импактном расплаве. Первый случай не вызывает сомнений в космогенной природе структуры. Однако обломки метеоритов сохраняются лишь в небольших (обычно менее 1 км) кратерах и за очень редкими исключениями принадлежат железным метеоритам, так как каменные метеориты легче, чем железные, плавятся и затем либо испаряются, либо растворяются в импактном расплаве. Поэтому их вещество обнаруживается обычно во второй или (чаще) третьей форме.

Следствием переработки метеорита-ударника (астероида, кометы) в ходе ударного события является заметное повышение в импактном расплаве содержания химических элементов, которых много в космических телах, но мало в земной коре. Количество Ni, Cr, Co, Ir, Os (и других платиноидов) увеличивается в расплавных импактиках в 2–10 раз по сравнению с породами мишени (но при этом распределяются они в расплавных импактиках неравномерно). Помимо увеличения содержания элементов-индикаторов важную информацию о космогенной природе астроблем несут изотопные характеристики некоторых элементов. Так, отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в

породах земной коры составляет $n \cdot 10^{-8}$, в глубинных (мантийных) породах $n \cdot 10^{-5}$, в расплавленных импактных стеклах Логойской (Белоруссия) и Пучеж-Катунской (Россия) астроблем $n \cdot 10^{-8}$, что однозначно указывает на отсутствие связи импактных событий с эндогенными процессами. Отношение $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ в породах земной коры близко к 10, в метеоритах и мантийных образованиях Земли оно около 1, в импактиках астроблемы Садбери (Канада) 4,6–7,8, что указывает на высокую долю корового материала в расплаве (до 100% для некоторых типов импактитов). Не менее информативными являются данные по изотопии других элементов или их пар (С, Cu, Ni, Sm-Nd, Re-Os и др.).

ИМПАКТНЫЕ СОБЫТИЯ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Сравнение поверхности Земли с поверхностью других планет и астероидов Солнечной системы легко обнаруживает, что на нашей планете выявлено очень мало метеоритных кратеров. Расчеты профессора В.Л. Масайтиса и М.С. Машака (Санкт-Петербург) показывают, что на территории России и сопредельных стран должно было бы находиться 1280 астроблем более 1 км диаметром, не стертых эрозией и обнажающихся на поверхности. Мы же знаем пока на этой площади только 42 метеоритных кратера (включая и мелкие и перекрытые более молодыми осадками). Это говорит о том, что наши знания астроблем весьма ограничены.

Между тем их изучение очень актуально как с научной (историко-геологической), так и с чисто практической стороны. Выше было отмечено, что катастрофические импактные события в истории Земли не раз совпадали с моментами резких изменений хода эндо- и экзогенных геологических процессов, “перестройками” в ее растительном и животном мире. Несмотря на обилие гипотез, причинно-следственная связь космогенных и эндогенных процессов остается недоказанной и неясной. Малое количество выявленных астроблем и особенно точных данных о времени их образования (лишь 50–

60 структур датированы радиоизотопными методами в интервале от нашего времени до 2,5 млрд лет назад) не позволяет всерьез обсуждать проблему периодичности импактных событий.

В то же время не вызывают сомнений факты возникновения в связи с этими событиями месторождений полезных ископаемых Ni, Cu, Pb и Zn, Hg, алмазов, колчедана и т.д. [6]. Помимо прямых генетических связей различных руд с импактными событиями следует помнить и о том, что астроблемы являются структурами, в которых после их возникновения формируются месторождения горючих сланцев, угля, цеолитов, гипса и ангидрита, они служат также ловушками для нефти и газа. Эти и другие полезные ископаемые успешно добываются из астроблем США, Канады, Швеции, Китая и других стран. Поэтому перед исследователями астроблем поистине безграничное поле деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сихотэ-Алиньский железный метеоритный дождь. М.: Наука, 1959. Т. 1. 304 с.; 1963. Т. 2. 372 с.
2. Мелюш Г. Образование ударных кратеров: Геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.
3. Ударные кратеры на Луне и планетах. М.: Наука, 1983. 200 с.
4. Фельдман В.И. Петрология импактитов. М.: Изд-во МГУ, 1990. 299 с.
5. Геология астроблем. Л.: Недра, 1980. 231 с.
6. Масайтис В.Л. Минерагенические системы импактных кратеров // Геология руд. месторождений. 1989. № 3. С. 3–17.

* * *

Вилен Изильевич Фельдман, доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрологии геологического факультета МГУ. Область научных интересов – петрология кристаллических пород, петрология импактитов. Автор более 200 статей, четырех монографий, восьми учебников и учебных пособий.