

СРАВНЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ УДАРОВ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С МОЩНЫМИ ВУЛКАНИЧЕСКИМИ ИЗВЕРЖЕНИЯМИ

В.М. Хазинс, В.В. Шувалов

Рассматриваются последствия ударов космических тел и извержений, происходящих с одинаковой частотой: раз в год, в тысячу лет, 50 тысяч лет и 10–100 миллионов лет. Показано, что на временных масштабах 1–1000 лет вулканические извержения значительно опаснее ударов космических тел. С увеличением временного масштаба относительная опасность импактных событий увеличивается.

Введение

Последствия ударов космических тел и вулканических извержений, так же как и характер взаимодействия между геосферами, сопровождающего такие явления, зависят от масштаба (или мощности) явлений. Масштаб ударных событий определяется, главным образом, энергией или размером ударника. Наиболее распространенной характеристикой мощности вулканических извержений является индекс VEI (Volcanic Explosivity Index), который определяется объемом извергнутого вещества: $VEI = \log_{10}(\text{объем извергнутого вещества в м}^3) - 4$. Иногда более удобной характеристикой оказывается [Mason et al., 2004] магнитуда M , $M = \log_{10}(m) - 7$, где m – масса извергнутого вещества в кг. Чаще всего вулканический индекс и магнитуда для конкретного события совпадают по величине.

При сравнении последствий ударов космических тел и вулканических извержений можно рассматривать действие ударов и извержений одного масштаба (оценив тем или иным способом энергию вулканического извержения или массу выброшенного в атмосферу вещества при ударе). Такое сравнение частично проведено в работе [Хазинс, Шувалов, 2008]. Однако не менее разумным и интересным с геофизической точки зрения представляется сравнение катастрофических явлений, происходящих с одинаковой частотой. Поэтому в данной работе мы выбираем характерные масштабы времени и сравниваем между собой последствия вулканических извержений и ударов космических тел, происходящих, в среднем, один раз за выбранные промежутки времени.

События, происходящие раз в год

Примерно раз в год на Землю падают космические тела размером в несколько метров, кинетическая энергия которых равна нескольким килотоннам тротилового эквивалента. Такие тела полностью разрушаются и почти полностью (или даже полностью) испаряются на высотах 30–40 км, вызывая мощные световые вспышки, наблюдаемые на расстояниях в сотни километров. До поверхности Земли могут долетать (с небольшой скоростью) мелкие фрагменты (метеориты). Никаких катастрофических последствий такие удары не производят. Опасные последствия возможны лишь при непосредственном контакте метеорита с уязвимым объектом, например, при попадании в космический корабль, но вероятность такого столкновения крайне мала. Возможно, в некоторых ситуациях мощные световые вспышки могут вызвать неадекватную реакцию отдельных людей (например, страх), а мощные световое и электромагнитное возмущения могут вызвать сбои в работе отдельных приборов и сложных автоматических систем.

С той же частотой, то есть примерно раз в год, происходят вулканические извержения с $VEI = 4$ [Simkin, 1993]. Последствия сильно зависят от характера извержения и ландшафта, окружающего вулкан. В зависимости от типа извержения возможны выброс вещества на высоты до 10–20 км, распространение потоков лавы и/или пирокластических потоков на расстояния до 10–20 км. Такие и даже менее мощные (и, соответственно, более частые) извержения регулярно вызывают разрушения (иногда целых населенных пунктов), эвакуацию, а иногда и гибель людей. Слабое извержение исландского вулкана Эйяфьятлайокудль ($VEI = 1$) в марте–апреле 2010 г. в силу геологических (ледник, таяние которого при взаимодействии с лавой инициировало взрывные выбросы пепла) и погодных (направление ветра, ясная погода) условий привело к частичному коллапсу авиасообщений в Европе. За последние 10 лет (начиная с 2000 года) зафиксировано более 350 вулканических извержений с $VEI = 4$. Из них 44 вызвали какие-либо разрушения, 40 извержений привели к массовой эвакуации, 15 – сопровождалась гибелью людей [Шувалов, Трубецкая, 2009].

Из сказанного выше следует, что с точки зрения катастрофических последствий происходящие примерно раз в год вулканические извержения с $VEI = 4$ значительно опаснее, чем происходящие с такой же частотой удары космических тел размером в несколько метров. Вулканические извержения приносят больший экономический ущерб и часто сопровождаются человеческими жертвами.

С точки зрения взаимодействия между геосферами вулканические извержения с $VEI = 4$ и удары космических тел указанных масштабов абсолютно различны. При вулканических извержениях с $VEI = 4$ происходит взаимодействие (обмен энергией и веществом) между литосферой и атмосферой, а иногда и с гидросферой (фреатомагматические извержения). Механизм взаимодействия – распространение лавовых или пирокластических потоков, или атмосферные плюмы (эруптивные колонки, коллапсирующие фонтаны). Возмущенная область расположена на высотах менее 10–20 км. При падении космических тел размером в несколько метров генерируются возмущения в верхней атмосфере (в том числе в ионосфере и магнитосфере) на высотах более 30–40 км. В результате пролета космического тела вдоль его траектории возникает горячая и разреженная область, которая из-за нарушения гидростатического равновесия начинает всплывать. В результате образуется струя (плюм) или всплывающее облако (наподобие термика при мощных взрывах), которые поднимают вещество из нижних слоев атмосферы и продукты разрушения/испарения метеороида на большие высоты (более 100 км).

События, происходящие раз в тысячу лет

Примерно раз в тысячу лет на Землю падает космическое тело размером порядка 100 метров, то есть происходит событие, аналогичное Тунгусской катастрофе или чуть более мощное. Если космическое тело каменное или кометообразное, то оно испытывает сильную фрагментацию на высотах 10–20 км, образуется высокоскоростная струя (со скоростью, близкой к начальной), состоящая из ударнонагретого воздуха, паров метеороида и его твердых фрагментов [Адушкин, Немчинов, 2005]. Мелкие фрагменты быстро испаряются, образуется газовая (из паров и горячего воздуха) струя, которая тормозится в атмосфере или при ударе о землю. В результате кратер не образуется, почти вся энергия выделяется в атмосфере. Ударная волна от такого взрыва вызывает массовые разрушения, а излучение «огненного шара» вызывает массовые пожары. Характерный размер зоны разрушений и зоны массовых пожаров составляет 50–100 км, то есть больше размера любого современного мегаполиса. Горячий газ поднимается вверх вдоль следа (горячего разреженного канала, образующегося за космическим телом при его движении в атмосфере), образуется плум, который достигает высот в несколько сотен или даже тысяч километров, генерируя сильные возмущения в ионосфере и магнитосфере [Адушкин, Немчинов, 2005]. Если падающее космическое тело является железным (вероятность чего не велика, так как доля железных тел в общем потоке не превышает 5%), то оно также разрушается в атмосфере, но его фрагменты не успевают заметно испариться, падают на землю с большой скоростью в виде компактного облака, образуя кратер размером порядка километра. Примером может служить хорошо известный Аризонский кратер, образовавшийся около 50 тысяч лет назад.

Тысяча лет это также характерное время между очень мощными вулканическими извержениями с $VEI = 7$ [Simkin, 1993]. Примером такого извержения может служить извержение вулкана Тамбора в 1815 году, самое мощное из зарегистрированных в истории. При таких извержениях в атмосферу выбрасывается 10^{14} – 10^{15} г аэрозоля на высоты до 40–50 км. Пирокластические потоки распространяются на расстояния в несколько сотен километров и на этих расстояниях в течение нескольких дней могут полностью экранировать солнечное излучение. Большинство вулканов расположены на побережье морей и океанов (часто на островах), поэтому обычно происходит взаимодействие лавовых или пирокластических потоков с водой, что приводит к генерации волн цунами. Цунами генерируются также при обрушении вулканических построек (как это было при извержении вулкана Кракатау в 1883 году). Сильное загрязнение атмосферы окислами серы при извержениях с $VEI = 7$ может вызывать заметные изменения климатических условий на всей Земле в течение нескольких лет из-за образования аэрозолей серной кислоты на стратосферных высотах. Влияние проявляется не только в понижении средней годовой температуры на 0,5–1,0 °C, но и в сильных погодных аномалиях (засухи, летние снегопады, наводнения и т.д.) в разных районах Земли.

Из перечисленных выше фактов следует, что и «в тысячелетнем масштабе» (характерное время существования современной цивилизации, отделяющей высокую степень развития человеческого общества от первобытного состояния) вулканические извержения значительно опаснее, чем удары космических тел. Количество людей, погибших при извержениях вулканов за последнее тысячелетие, исчисляется сотнями тысяч, в то время как о жертвах ударов космических тел ничего не известно. Известны целые города, уничтоженные извержениями. Единственная же

зафиксированная ударная катастрофа такого масштаба (Тунгусская) произошла в глухой сибирской тайге и вызвала лишь уничтожение леса (вывал и пожары) на площади 1–2 тысячи квадратных километров. Однако в действительности все не так просто. Практически все вулканы сконцентрированы на очень небольшой площади. Поэтому грубо можно сказать, что вулканическая опасность представляет серьезную угрозу примерно для 1/10 части территории, населенной людьми. Для жителей, скажем, Москвы вероятность погибнуть от извержения вулкана практически равна нулю. В то же время если бы Тунгусская катастрофа произошла над Москвой (а с точки зрения вероятности подвергнуться удару все точки поверхности Земли равноправны), то столица России была бы полностью уничтожена, а количество жертв исчислялось бы миллионами. Любые катастрофические явления особенно страшны, когда затрагивают потенциально опасные объекты (химические производства, атомные станции и т.д.). Обычно такие объекты не строят в вулканопасных районах. Поэтому такие объекты могут быть более уязвимы для ударов, чем для извержений. Суммируя вышесказанное, можно предположить, что рассматриваемые в этом разделе вулканические извержения с $VEI = 7$ значительно опаснее ударов стометровых космических тел примерно на 10% обитаемой территории, на остальных 90% опаснее удары стометровых тел. Цифра 10% это только грубая (по порядку величины) оценка, которая требует уточнения.

Увеличение мощности извержений (с $VEI = 4$ до $VEI = 7$) и размера ударников (с 1–5 до 100 метров) делает эти явления и их последствия более похожими друг на друга. В обоих случаях энергия выделяется в тропосфере, где происходит торможение направленной вниз струи паров и ударно нагретого воздуха, образовавшейся из разрушенного метеороида, и направленной вверх струи пара и пепла, вырывающейся из жерла вулкана (мы рассматриваем взрывные извержения). В обоих случаях горячая область поднимается вверх в виде ударного плюма или эруптивной колонки, перенося вещество и энергию в стратосферу и даже выше (только при ударах). Разница между явлениями определяется концентрацией энергии и наличием метеорного следа при ударе. При ударе задействованная масса (порядка массы ударника, которая для стометрового тела составляет 10^{11} – 10^{12} г) невелика, значительно меньше массы вещества, выброшенного в атмосферу при извержении вулкана (10^{17} г при $VEI = 7$). Зато концентрация энергии (на единицу массы) при ударе значительно выше, поэтому ударный плюм имеет меньшую массу, но более высокую температуру и более низкую плотность (чем эруптивная колонка). Поэтому вулканические извержения значительно сильнее загрязняют атмосферу (после извержения Тамборы погодные аномалии наблюдались 1–3 года), но только на высотах до 40–50 км. При ударах стометровых космических тел воздух из тропосферы и сконденсировавшиеся частицы вещества метеороида выбрасываются в ионосферу и даже в магнитосферу, вызывая заметные электромагнитные возмущения и явления свечения атмосферы [Адушкин и Немчинов, 2005]. Кроме того, химический состав вещества, выбрасываемого в атмосферу при ударах и извержениях, может сильно различаться.

События, происходящие раз в пятьдесят тысяч лет

Чем больше мощность вулканического извержения, тем реже оно происходит. Мощность известных вулканических извержений взрывного типа ограничена магнитудой $M = 8$ (супервулканы) и именно эти вулканы определили выбор времен-

ного интервала в настоящем разделе. Статистика подобных извержений в значительной мере затруднена, так как со временем в стратиграфических отложениях следы вулканически кальдер теряются вследствие эрозии и тектонических процессов. Среди 47 перечисленных в работе [Mason et al., 2004] супервулканов только 4 старше 50 млн лет и три старше 100 млн лет. Последние – одного и того же возраста (450 млн лет), на востоке США и в Европе (Эстония). В предположении, что все извержения магнитуды 8 в недавнем прошлом оставили кальдерные структуры, которые были обнаружены, частота извержений с $M = 8$ составляет одно в 50 тыс. лет [Rampino, 2008].

Минимальный возраст обнаруженного супервулкана – 26,5 тыс. лет (Новая Зеландия). Этот вулкан относится к группе из нижнего диапазона мощностей супервулканов ($M = 8,1$). В верхний диапазон ($M = 8,8-9$) попали более десятка вулканов, среди которых наиболее известны Йелоустоун в США ($M = 8,3-8,8$) и Тоба в Индонезии ($M = 8,8$). Извержение вулкана Тоба (74 тыс. лет) – самое близкое по времени мощнейшее извержение и потому достаточно полно сохранившее следы в окружающей среде.

Общие характеристики извержений супервулканов приведены в работе [Хазинс, Шувалов, 2008]. Здесь мы остановимся на анализе извержения супервулкана Тоба как важного примера для изучения возможных воздействий взрывного вулканизма на глобальную атмосферу и климат.

По оценкам [Rampino, 2008] высота эруптивных облаков при извержении вулкана Тоба составила 32 ± 5 км, размер кальдеры 100×30 км. Время выпадения пепла над Индийским океаном достигало двух недель. В процессе извержения было выброшено до $2 \cdot 10^{16}$ г мелкодисперсной пыли и примерно $1,5 \cdot 10^{15}$ г аэрозолей серной кислоты, что привело к образованию мощного долгоживущего аэрозольного облака в стратосфере. Микрофизические процессы типа коагуляции, конденсации и, как следствие, укрупнение частиц и их выпадение из облака, действуют на облако ограничивающим образом. Однако в настоящее время нет данных относительно поведения аэрозолей серной кислоты в столь плотном облаке. В то же время по оценкам воды, вынесенной вулканом Тоба в стратосферу, должно было хватить для образования аэрозолей серной кислоты из серосодержащих газов. Исследования кернов гренландских льдов показали, что с извержением Тобы связан 6-летний период повышенной концентрации вулканической серы и в течение этого периода в атмосфере находилось от $1,5 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{15}$ г аэрозолей серной кислоты.

Существенное изменение прозрачности атмосферы не могло не породить долговременные климатические последствия. Однако температурный режим атмосферы, возможность и длительность ядерной зимы, являются предметом обсуждения и в настоящее время. По оценкам, в случае реализации режима ядерной зимы [Turco et al., 1990], наземные температуры в средних широтах снизятся на $5-15^\circ$, а температура поверхности океана опустится на $2-6^\circ$. Если предположить, что существует линейная зависимость между охлаждением поверхности и количеством аэрозолей, то из анализа извержения вулкана Тамбора в 1815 г. следует, что извержение Тобы должно было привести к падению средней температуры на $3,5^\circ$. Однако воздействие супермощного извержения Тобы на климат может настолько отличаться от недавних исторических извержений, что последние нельзя использовать в качестве уменьшенных аналогий. Тем не менее, достаточно очевидно, что извержение Тобы инициировало долговременное понижение температуры поверхности Земли, уменьшение освещенности и оказало существенное влияние на окружающую среду. Извержение Тобы должно было привести к деградации расти-

тельности, снижению продуктивности океана, уменьшению количества пищи для травоядных, а впоследствии – для всего животного мира. Не исключено, что экологические последствия извержения вулкана Тоба были настолько сильными, что могли привести к резкому спаду популяции населяющих в то время Землю людей. Во всяком случае, именно к периоду 65 тыс. лет тому назад исследователи относят резкое сокращение человеческой популяции и последующий быстрый рост (теория бутылочного горла).

Chapman и Morrison (1994) предположили, что глобальные климатические эффекты суперизвержений типа извержения вулкана Тоба могут быть схожими с эффектами, производимыми падением астероида диаметром 1 км. При таких ударах выделяемая энергия – 10^5 – 10^6 Мт в тротиловом эквиваленте, диаметр кратера – 20–40 км, и по расчетам выброс мелкодисперсной фракции достигает 1000 Мт [Toon et al., 1997]. Вулканические аэрозоли имеют большее время выпадения по сравнению с импактными, так что мощное извержение может иметь более длительное воздействие на окружающую среду, чем импакт, производящий такое же количество выбросов в атмосферу. Однако 50 тыс. лет это примерный интервал между ударами тел размером около 500 м с массой и энергией на порядок меньшими, чем у километровых тел. Таким образом, и на временном интервале 50 тыс. лет вулканические удары оказываются, по-видимому, более опасными, чем удары космических тел. Однако масштабы и последствия явлений уже близки.

Процессы взаимодействия между геосферами, сопровождающие удары 500-метровых космических тел и вулканические извержения с $VEI = 8$, заметно отличаются. При взрывных вулканических извержениях вещество из литосферы выбрасывается на высоты до 40–50 км, начальная стадия подъема определяется инерционным движением газопылевой струи, вылетающей из жерла, в верхней части эруптивной колонки подъем горячего газопылевого облака определяется плавучестью. Дальнейшее распространение аэрозолей зависит от глобальной циркуляции атмосферы. При ударах космических тел вещество из литосферы выбрасывается на ионосферные и даже магнитосферные высоты [Адушкин и Немчинов, 2005], двигаясь со скоростями до нескольких км/с (сначала внутри разреженного следа) по баллистическим траекториям. Время распространения возмущений по всей Земле – порядка часа.

События, происходящие раз в 10–100 миллионов лет

Рассмотренные в предыдущих разделах извержения охватывают весь спектр вулканов взрывного типа. Однако геологическая история Земли хранит следы еще более мощных извержений эффузивного типа, в которых истечение магмы из обширных протяженных трещин в течение нескольких миллионов лет приводит к образованию континентальных магматических провинций, в которых объем застывшей лавы достигает несколько миллионов кубических километров, что на три порядка выше, чем при извержениях супервулканов. В настоящее время обнаружено 11 магматических провинций, образованных в Фанерозое. При таком небольшом количестве событий говорить о периодичности довольно сложно. Поэтому часто период оценивают в 10–100 млн лет. С помощью спектрального анализа временного ряда Rampino и Stothers (1988) показали, что возможно период составляет 32 ± 1 млн лет.

Раз в сто миллионов лет на Землю падают космические тела размером порядка 10 км. Сохранились, по крайней мере, 4 кратера размером более 100 км, обра-

зованных такими ударами: Вредерфорт, Попигаи, Садбери и Чиксулуб [Адушкин и Немчинов, 2005].

В работе [Хазинс, 2007] проведен сравнительный анализ воздействия на экосистему событий подобного масштаба. Из анализа следует, что и удары десяти-километровых тел, и мощные эффузивные извержения вызывают литосферно-атмосферное взаимодействие, приводящее к глобальному возмущению земной атмосферы и катастрофическим последствиям вплоть до массовых вымираний биоты. Однако ни одна из гипотез – ни импактная, ни вулканическая – не способны окончательно связать массовые вымирания с каким-либо одним механизмом воздействия на окружающую среду. Основной слабостью импактной теории является отсутствие геологических следов в стратиграфических слоях, соответствующих массовым вымираниям, кроме границы мелового и третичного периодов. Однако отсюда не следует несостоятельность импактной гипотезы, так как тонкие стратиграфические слои, характеризующие импакты, трудно обнаружить. К тому же за сотни миллионов лет эти слои в результате эрозии, вымывания, тектонических сдвигов могли перемешаться с окружающей породой. С другой стороны, гипотеза платобазальтового вулканизма как причины массовых вымираний поддерживается лишь корреляцией (но удивительной!) между четырьмя парами событий, связанными с наиболее мощными вымираниями за прошедшие 250 млн лет. Не исключено, что платобазальтовые извержения сопровождалось взаимодействием с водой морей или океанов, что приводило к взрывным выбросам [Peate, Bryan, 2008]. Платобазальты покрывают большую площадь, имеют значительную толщину и поэтому легко распознаваемы по прошествии многих миллионов лет, но платобазальтовый вулканизм не оставляет следов в отдаленных от вулканизма районах, которые можно было бы связать с деятельностью этих вулканов.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что если мы рассматриваем вулканические извержения и удары космических тел, происходящие в среднем раз в 1–100 лет (например, с характерным интервалом, равным длительности человеческой жизни), то первые оказываются значительно опаснее для человека и приносят больший материальный ущерб. Однако при переходе к более редким явлениям относительная опасность ударных событий возрастает. Так в масштабе «геологических» времен 10–100 млн лет удары и извержения, по-видимому, приводят к сравнимым катастрофическим последствиям, в том числе, возможно, могут вызывать массовые вымирания биоты. Если перейти к еще большим временам, сравнимым со временем существования Земли, то удары будут играть определяющую роль, так как сама наша планета и первичные геосферы были образованы именно за счет ударных процессов.

Тем не менее нельзя недооценивать опасность ударных событий, происходящих примерно раз в 1000 лет, которая увеличивается из-за полной непредсказуемости времени (обнаружить стометровые тела заранее практически невозможно) и места (в отличие от вулканов, сконцентрированных на относительно небольшой части поверхности Земли, удары возможны в любой точке, в том числе и в крупных мегаполисах) возможной катастрофы. Еще одним фактором, усиливающим «астероидную» опасность, является меньшая изученность, экзотичность явления. Извержения опасны, но понятны. Удары же космических тел могут быть приняты

населением за атомную атаку, нападение пришельцев и так далее (история изучения Тунгусской катастрофы является ярким примером), что может привести к дополнительной панике и вызвать неадекватную реакцию.

С точки зрения взаимодействия между геосферами удары отличаются тем, что могут производить заметные возмущения в ионосфере и магнитосфере.

Работа выполнена в рамках программ № 4 Президиума РАН и № 7 ОНЗ РАН.

Литература

Адушкин В.В. и Немчинов И.В. (ред.) Катастрофические воздействия космических тел. Институт динамики геосфер РАН. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 310 с.

Хазинс В.М. Сравнительный анализ ударной и вулканической гипотез массовых вымираний // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2007. С. 226–232.

Хазинс В.М., Шувалов В.В. Супервулканы и удары крупных космических тел: сопоставление и прогноз // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 153–161.

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Влияние фреатомагматизма на последствия вулканических извержений // Проблемы взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2009. С. 267–272.

Chapman C.R. and Morrison D. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard // Nature. 1994, v. 367, p. 33–40; doi:10.1038/367033a0.

Mason B.G., Pyle D.M., Oppenheimer C. The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth // Bull. Volcanol. 2004, v. 66, p. 735–748; doi: 10.1007/s00445-004-0355-9.

Peate I.U., Bryan S.E. Re-evaluating plume-induced uplift in the Emeishan large igneous province // Nature Geoscience. 2008, v. 1, pp. 625–629; doi:10.1038/ngeo281.

Rampino M.R. Super-volcanism and other geophysical processes of catastrophic import // in Global catastrophic risks, edited by N. Bostrom and M.M. Cirkovic, Oxford University Press, 2008, 554 p.

Rampino M.R. and Stothers R.B. Flood Basalt Volcanism During the Past 250 Million Years // Science. 1988, v. 241, no. 4866, pp. 663–668; doi: 10.1126/science.241.4866.663.

Simkin T. Terrestrial volcanism in space and time // Annu.Rev. Earth Planet Sci. 1993, v. 21, p. 427–452.

Toon O.B., Turco R.P., Covey C. Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // Reviews of Geophysics. 1997, v. 35, no. 1, p. 41–78.

Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., and Sagan C. Climate and smoke: an appraisal of nuclear winter // Science. 1990, v. 247, no. 4939, pp. 166–176; doi: 10.1126/science.11538069.