

ПАДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА – ТИПИЧНОЕ СОБЫТИЕ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

В.В. Светцов, Н.А. Артемьева, О.П. Попова, В.В. Шувалов

Челябинское событие (далее ЧС) описывается в контексте множественных столкновений Земли с космическими объектами разного размера на протяжении всей ее эволюции. Падения тел размером менее 10 м происходят довольно часто, метровых – в среднем около одного раза в неделю, но, как правило, эти падения происходят в местах, удаленных от жилых районов, и поэтому фиксируются только специалистами. Челябинский метеороид (далее ЧМ), хотя и имел довольно большой размер ~20 м, представлял собой типичный каменный астероид. Такие тела сталкиваются с Землей примерно один раз в 50–100 лет, но уникальность этого события связана главным образом с местом падения – в район с высокой плотностью населения и развитой промышленностью. В статье рассмотрены основные физические явления, происходящие при взаимодействии метеороидов размером в первые десятки метров с атмосферой – торможение, абляция, фрагментация, распространение ударной волны. Описаны современные способы регистрации и моделирования болидных явлений. В заключительной части формулируются актуальные задачи для дальнейших исследований.

Опасные последствия столкновений астероидов и комет с Землей

Столкновения космических тел (астероидов и комет) с Землей происходили регулярно еще до полного формирования нашей планеты и на протяжении всей ее жизни. Удары крупных (>100–300 м) космических тел приводят к образованию кратеров размером от нескольких километров до сотен километров и способны изменить ход эволюции биосферы. Падения небольших тел случаются гораздо чаще, но, как правило, не связаны со значительными по площади и времени действия последствиями. Железные астероиды в среднем прочнее каменных и с большей вероятностью достигают поверхности Земли и оставляют ударный кратер на ее поверхности. Кометы, средняя плотность ядер которых меньше нормальной плотности воды, наоборот, легче тормозятся атмосферой. Но и те и другие сталкиваются с Землей значительно реже, чем каменные тела, которые составляют наибольшую долю объектов, сближающихся с Землей. Поэтому мы исследуем в первую очередь удары каменных тел, таких как ЧМ.

Падения космических тел на Землю представляют собой реальную опасность для человечества (см., например, [Шустов, 2011]). В процессе эволюции Земли неоднократно происходили массовые вымирания видов животных и растений, и одно из них на границе мелового и палеогенового периодов (65 млн лет назад) совпадает по времени с ударом космического тела диаметром 10–15 км [Alvarez et al., 1980; Hildebrand et al., 1991; Schulte et al., 2010]. Такие крупные удары происходят чрез-

вычайно редко, раз в 100 миллионов лет, и изучение их последствий представляет интерес главным образом с точки зрения изучения эволюции Земли и жизни на нашей планете. В ближайшее столетие Земле не угрожает столкновение с 10-километровым телом (хотя и имеется незначительная вероятность столкновения с долгопериодической кометой). Более того, орбиты 85% астероидов сближающихся с Землей (АСЗ) с диаметром более 1 км вычислены с высокой точностью, а угроза столкновения с ними почти исключена (<http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>). Поэтому гораздо более актуальным является изучение ударов существенно меньших по размеру тел – начиная от первых десятков метров до сотни метров. Во-первых, столкновения с такими телами происходят не так уж редко – примерно раз в 50–1000 лет [Neukum and Ivanov, 1994; Brown et al., 2013]. Во-вторых, такие тела весьма трудно выявить заранее, в лучшем случае тела в несколько десятков метров можно надеяться обнаружить за несколько дней до столкновения, таким образом, все действия по предотвращению последствий таких ударов должны быть чрезвычайно быстрыми. В-третьих, последствия могут быть не только локальными (как в случае удара, образовавшего кратер Метеор размером 1,2 км), но и региональными (Тунгусское событие 1908 года) в зависимости от типа космического объекта и его траектории. И, наконец, современная цивилизация является чрезвычайно чувствительной по отношению к явлениям, которые были незначительными еще сто лет назад: сильные электромагнитные возмущения при ударе космического тела могут привести к полной потере дальней космической связи, а сам взрыв космического тела в атмосфере может быть воспринят как ядерная атака недружественной державы; известные по Тунгусскому событию 1908 года разрушения и пожары на территории в две тысячи квадратных километров могут случиться не в пустынных районах Сибири, а над крупнейшими европейскими городами, плотинами, ядерными электростанциями и другими уязвимыми объектами.

Масштаб ударного события определяется, главным образом, энергией космического тела, которая зависит от его размера, плотности и скорости. Плотности и скорости типичных космических тел меняются в не очень широких пределах, и поэтому часто масштаб события характеризуют просто размером тела, как величиной более наглядной. Плотность и прочность могут заметно влиять на последствия падения небольших тел, которые разрушаются, тормозятся и выделяют энергию в атмосфере. Для оценки угрозы ударов космических тел были разработаны различные шкалы, например, Туринская [Binzel, 2000] (см. рис. 1). Эта шкала оценивает вероятность угрозы на основе двух параметров: вероятности столкновения и кинетической энергии (или размера) ударника.

Эффекты, вызванные падениями космических тел, можно условно разделить по времени их действия на кратковременные (от секунд до первых часов) и долговременные (сутки – годы), а по радиусу воздействия – на локальные (<10 км), региональные (<1000 км) и глобальные. Долгосрочные глобальные последствия характерны для самых крупных ударных событий (размер ударника >10 км) и, как правило, связаны с выбросом в атмосферу значительного количества мелких частиц и химически активных газов [Toon et al., 1997]. Пыль, сажа от пожаров и сульфатные аэрозоли, если порода в месте падения содержит соединения серы, приводят к понижению прозрачности атмосферы, экранировке солнечного излучения и к понижению температуры поверхности (эффект ядерной зимы). Парниковые газы (углекислый газ, метан, вода) оказывают противоположное действие, экранируя инфракрасное излучение с поверхности и приводя к существенному повышению температуры. Суммарный эффект до сих пор не ясен по двум причинам: во-первых, точное опи-

ударе в воду образуются волны цунами, которые могут распространяться на большие расстояния без существенного затухания. Отметим, что границы между разными сценариями условны и зависят от типа ударника. Приведенные выше значения граничных размеров характерны для каменных тел, для кометоподобных тел они выше, для железных – ниже.

Тунгуска и другие известные падения XX–XXI веков

Самое мощное и впечатляющее падение космического тела в последние столетия – Тунгусское событие 30 июня 1908 года [см., например, Vasilyev, 1998; Светцов, Шувалов, 2005]. Вывал леса на площади более 2000 км², пожар, охвативший около 500 км² тайги, сейсмическое событие магнитудой 4,8–5,2, региональное геомагнитное возмущение, аномальные атмосферные явления на обширной территории России и Европы, акустико-гравитационные волны, обогнувшие Земной шар, и в то же время отсутствие кратера и сколь-нибудь малых фрагментов метеорита долгое время казались загадочными.

По вывалу леса, магнитуде сейсмического сигнала и амплитуде акустико-гравитационной волны можно приблизительно определить, что выделившаяся энергия составляет около 10 Мт ТНТ (1 кт ТНТ = $4,18 \cdot 10^{12}$ Дж), что соответствует кинетической энергии каменного тела диаметром 50–80 м или рыхлого ледяного размером ~100 м при характерной скорости 20 км/с. Кроме того, по характеру вывала леса и возникновению пожара ясно, что выделение энергии произошло на высоте 5–10 км. Как такое крупное тело могло затормозиться в атмосфере долго оставалось неясным, порождая множество альтернативных гипотез – от ядерного взрыва инопланетного космического корабля до взрыва большого объема природного газа. Но показания очевидцев, наблюдавших падение, отсутствие признаков радиации и обнаружение иридия в слоях торфа 1908 года [Назаров и др., 1990] говорили в пользу гипотезы удара астероида или кометы. Объяснить торможение достаточно крупного тела в атмосфере удалось только в 80-е годы – при движении в атмосфере оно разрушается и расплющивается под действием аэродинамических нагрузок, превращаясь в груды камней, и поэтому тормозится гораздо эффективнее, чем единое твердое тело [Григорян, 1979; Chyba et al., 1993]. Интересно, что тела, подобные Тунгусскому, 50–100 м в диаметре, имеют гораздо больше шансов полностью испариться в атмосфере, чем тела размером порядка 1–10 м, в том числе Челябинский метеорит. Крупные тела проникают в более плотные слои атмосферы, где испытывают большие нагрузки и дробятся на мелкие фрагменты, а потоки излучения возрастают благодаря большим оптическим толщинам в плотных слоях нагретого воздуха [Svetsov, 1996].

Еще одной интересной особенностью падений тел размером в десятки метров и более является образование атмосферного плюма. А именно, после торможения и выделения энергии космического объекта нагретый воздух, пары и частицы тела ускоряются вверх вдоль разреженного следа, оставленного падающим телом в атмосфере, и, поднимаясь вверх, образуют расширяющийся объем вещества ударника и воздуха, поднятого из нижних слоев атмосферы. Плюм не образуется при падении тел меньшего размера и при малых углах наклона траектории (как в случае Челябинского метеорита), потому что след оказывается тонким и быстро перемешивается с окружающим воздухом из-за развития неустойчивостей [Shuvalov, 1999]. Именно в плюме вещество Тунгусского космического тела в виде паров, мелких

капель и частиц было выброшено в верхние слои атмосферы, а затем упало вниз, затормозившись на высотах порядка 80–90 км и создав облако частиц диаметром порядка 1000 км [Shuvalov and Artemieva, 2002; Artemieva and Shuvalov, 2010]. Затем это вещество, подхваченное высотными зональными ветрами, дующими на запад со скоростями около 50 м/с [Portnyagin and Solovjova, 2000], распространилось вплоть до Англии и произвело наблюдавшиеся атмосферные эффекты.

Проекцию траектории Тунгусского космического тела на поверхность Земли удалось определить. Но так как остались неизвестными и скорость входа в атмосферу, и угол наклона траектории к поверхности, то орбиту космического тела определить невозможно. В слоях торфа, датированных 1908 годом, было обнаружено вещество космического тела в виде повышенных концентраций ряда элементов. Соотношение этих элементов довольно хорошо соответствует углисту хондриту [Hou et al., 2005]. Но нельзя и исключить тело кометного происхождения, минеральная составляющая которого может быть близка к углистым хондритам.

Другое знаменитое событие – Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь 12 февраля 1947 года – связано с падением железного астероида с начальной массой от 200 до 500 т [Немчинов, Попова, 1997]. В этом случае тело тоже разрушалось в атмосфере, но не сохраняло свою связность – отдельные фрагменты расходились в полете за счет аэродинамических сил [Passey and Melosh, 1980; Artemieva and Shuvalov, 2001]. По обобщению показаний очевидцев фрагментация происходила в несколько стадий на высотах 58, 34, 16 и 6 км [Дивари, 1959]. Отдельные фрагменты, массой до 1700 кг, затормозившись, достигли поверхности со скоростями до нескольких километров в секунду и образовали кратерное поле размером 0,3×0,6 км, причем диаметр самого большого кратера был более 25 м [Светцов, 1998; Artemieva and Shuvalov, 2001]. Всего было собрано несколько десятков тысяч фрагментов общей массой более 27 т, но вся масса выпавшего вещества примерно в 3 раза больше. Численное моделирование падения [Немчинов, Попова, 1997] дало хорошее согласие с результатами натурных исследований при угле наклона траектории к поверхности около 40°, скорости входа в атмосферу 12–15 км/с и начальной кинетической энергии астероида 3,5–13 кт ТНТ.

Интересное кратерообразующее падение тела с высокой прочностью – железный метеорит Стерлитамак массой более 1500 кг (размером несколько меньше метра), который, затормозившись в атмосфере 17 мая 1990 года, достиг поверхности Земли со скоростью более 2 км/с и образовал кратер диаметром около 10 м [Ivanov, Petaev, 1992]. Несколько больший кратер диаметром 13 м образовал перуанский каменный метеорит Каранкас 15 сентября 2007 года, который оказался обыкновенным хондритом класса Н [Tancredi et al., 2009]. Особенность места падения этого метеорита состоит в том, что грунтовые воды содержат ядовитые вещества – соединения мышьяка и, возможно, серу. Выделение в атмосферу ядовитых газов после удара вызвало отравление местных жителей, что говорит еще об одном факторе астероидной опасности. Напомним, что одна из гипотез массового вымирания биоты 65 млн лет назад – выделение в атмосферу серы, которая содержалась в осадочных породах в месте падения астероида, образовавшего кратер Чиксулуб в Мексике.

Менее прочный каменный астероид 2008 TC₃ массой около 80 т и размером около 4 м вошел в атмосферу 7 октября 2008 года и разрушился на высотах 45–33 км над Нубийской пустыней в Судане [Jenniskens et al., 2009]. Было найдено около 600 фрагментов метеорита, названного Алмахата Ситта, общим весом около 11 кг [Shaddad et al., 2010]. Фрагменты были классифицированы как редкий класс метеоритов – аномальный урелит и среди них встречались фрагменты энстатитовых и

обычных хондритов. Это был первый случай, когда удар небольшого тела был заранее предсказан – астероид был обнаружен астрономами примерно за сутки до входа в атмосферу.

Отметим еще одно падение, показывающее возможность полного разрушения и испарения, крупных малопрочных каменных метеорных тел в атмосфере, а именно падение 3 сентября 2004 г. над Антарктикой очень крупного болида, доатмосферная масса которого оценивается в 10^6 кг [Klekosciuk et al., 2005]. Разрушение тела произошло на высотах 32 и 25 км. Через несколько часов после падения, на высоте более 20 км было обнаружено облако микрочастиц размером 1–10 мкм, масса которого составляла также около 10^6 кг, что подтверждает полное разрушение и испарение тела.

Способы наблюдения и регистрации потенциально опасных объектов

Астрономические наблюдения за астероидами размером от нескольких метров до первых десятков метров в настоящее время практически невозможны ввиду их малого размера. Такие тела могут быть обнаружены на подлете к Земле только случайно, как, например, упоминавшийся выше 4-метровый астероид 2008 TC₃. Говорить о регулярном наблюдении за такими объектами, вычислении их траекторий и оценке возможности столкновения с Землей не приходится, то есть пока нам остается смириться с тем фактом, что падения типа ЧМ не могут быть предсказаны заранее, а могут быть зарегистрированы в большинстве случаев лишь после их входа в атмосферу.

Система геостационарных спутников министерства обороны США (МО США) была создана для глобального контроля за проведением ядерных взрывов и других военных испытаний на поверхности или в атмосфере Земли. За восемь лет (1994–2002 гг.) система зарегистрировала около 300 вспышек излучения в атмосфере в инфракрасном и видимом диапазонах – возможных болидных явлений. Восстановление параметров метеороидов по этим данным является довольно сложной задачей, так как требует знания спектров излучения и эффективности преобразования кинетической энергии в световую [Nemchinov et al., 1997; Brown et al., 2002]. К сожалению, полный набор этих данных в настоящее время недоступен для научного анализа, были опубликованы только результаты наблюдений за 1996–1998 годы. В случае падения астероида TC₃ 2008 была опубликована излученная энергия и словесное описание световой кривой (зависимость мощности излучения от времени) [Jenniskens et al., 2009], а для ЧМ – только величина излученной энергии. В последнем случае авторам статьи [Brown et al., 2013] была дана возможность откалибровать максимум световой кривой, полученной из наземных наблюдений, по спутниковым данным.

Система наблюдений с земли обычно охватывает меньшие площади (порядка 10^6 км²), но позволяет при хороших погодных условиях регистрировать световые кривые, спектры излучения и при базисных наблюдениях (то есть при регистрации с нескольких независимых точек наблюдения) определять траектории болидов и возможное место падения метеоритов. Такие системы были развернуты в США [Prairie Network, McCrosky et al., 1976], Канаде [Halliday et al., 1996], Европе [European Network, Oberst et al., 1998] и в Австралии [Desert Fireball Network (DFN), Townner et al., 2012]. Две последние системы являются действующими в настоящее время и позволяют обнаруживать метеориты после их регистрации в атмосфере,

давая, таким образом, уникальную возможность сравнения неявно определенных параметров (плотность, тип объекта) с лабораторными измерениями *in situ*. Всего по одному метеориту было найдено во время работы Прерийной и Канадской сетей (Lost City и Innisfree), несколько метеорито-образующих болидов было зарегистрировано локальными наблюдательными сетями (Grimsby, Villalbeto de la Peña и др.), полет нескольких метеоритов (Pribram, Neuschwanstein, Jesenice) был зарегистрирован Европейской сетью. Случайные видео и фоторегистрации также оказываются очень полезными при изучении входов космических тел в атмосферу, они помогли найти такие метеориты как Moravka, Tagish Lake и другие. Недавно развернутая система DFN имеет очень хорошие перспективы, так как поиск метеоритов в пустынных районах Австралии значительно эффективнее (два метеорита зарегистрированы и найдены всего за 4 года наблюдений).

Движение метеороидов в атмосфере создает сильные акустические возмущения [ReVelle, 1976]. Длинные инфразвуковые волны (<20 Гц) распространяются на большие расстояния и могут быть зарегистрированы международной мониторинговой системой IMS, которая, как и геостационарные спутники, была создана для военных целей, но способна регистрировать крупные болидные события [Argowsmith 2008]. Расшифровка акустических сигналов является нетривиальной задачей и часто дает неоднозначные результаты (например, в случае падения метеорита Каранкас).

Сейсмические сигналы появляются в результате взаимодействия ударных или акустических волн, распространяющихся в атмосфере, с поверхностью земли и могут служить дополнительным источником информации. Как правило, сейсмографы являются частью IMS (International Monitoring System). Таким образом, заметная часть крупных метеороидов (>1 м) может быть в настоящее время зарегистрирована спутниками МО США (оптические данные) и/или системой IMS (акустические и сейсмические данные).

Дополнительные данные, способные помочь поиску метеоритов, может представлять такая система наблюдений как погодные радары, чья эффективность была продемонстрирована недавно [Fries and Fries, 2010]. Действие радаров основано на Допплер-эффекте, они способны «увидеть» метеороид на высотах <20 км, то есть на той части траектории, где метеорное тело, затормозившись, перестает излучать и оказывается невидимым для оптических наблюдений. Точность таких радарных наблюдений невысока, но позволяет существенно сузить площадь поиска потенциальных метеоритов.

Пролет ЧМ продемонстрировал, что современная любительская видео- и фотосъемка может служить чрезвычайно эффективным механизмом регистрации пролета метеороидов. Именно сотни фото-видеозаписей плюс запись камер наблюдения позволили воспроизвести траекторию этого полета, оценить светимость и энерговыделение, выявить высоты интенсивной фрагментации и даже обнаружить самый крупный фрагмент ЧМ, достигший поверхности.

Физические процессы при движении метеороида в атмосфере и численное моделирование

При движении космического тела в атмосфере Земли с космической скоростью (>11 км/с) происходит несколько важных процессов. Во-первых, тело тормозится. Интенсивность торможения определяется размером тела, его формой, плотно-

стью, скоростью и плотностью атмосферы. Во-вторых, образующаяся УВ сильно нагревает воздух, который начинает излучать (поэтому мы и видим болид). Часть излучения попадает на космическое тело и испаряет его, то есть происходит процесс абляции. Интенсивность абляции зависит от скорости тела и его свойств, выраженных в коэффициенте абляции, который может быть определен экспериментально, по наблюдениям или вычислен методами радиационной газовой динамики.

Эти два процесса были поняты и подробно исследованы еще в 30-х годах прошлого века. Зная коэффициенты торможения и абляции, а также начальные условия (при входе в атмосферу), решить дифференциальные уравнения, описывающие эти процессы, не составляет большого труда. Однако существует еще один процесс, важность которого была осознана сравнительно недавно – разрушение или фрагментация метеороида под действием аэродинамических сил [Григорян 1979; Chyba et al., 1993]. Дело в том, что метеороид, проникая во все более плотные слои атмосферы, подвергается возрастающим динамическим нагрузкам. Когда нагрузки, выражающиеся в первую очередь давлением за ударной волной перед телом, превышают обычно невысокую прочность метеороида [Pорова et al., 2011], происходит потеря целостности объекта, его разрушение на отдельные части. Разрушенное тело под действием аэродинамических сил начинает деформироваться: тело становится подобным капле жидкости, оно изменяет свою форму (сплющивается), а куски разрушенного метеороида разлетаются (из одного тела образуется несколько). Фрагменты разрушенного метеороида имеют большую прочность, чем исходное тело, и в течение некоторого времени летят, не разрушаясь. В зависимости от природы объекта и его размера, процесс движения разрушенного метеороида можно описать двумя приближенными способами. Один предполагает, что тело сохраняет свою целостность, но меняет форму, сильно расширяясь в направлении, перпендикулярном его скорости, и постепенно превращаясь в «блин» [Chyba et al., 1993]. Другой способ рассматривает независимое движение образовавшихся фрагментов [Passey and Melosh, 1980, Artemieva and Shuvalov, 2001]. Первый сценарий больше подходит для описания крупных малопрочных тел (Тунгуска, кометные тела), второй – для описания небольших или очень прочных тел (например, железных метеороидов). Обе модели содержат свободные параметры и, как правило, варьируя эти параметры и комбинируя обе модели, удается «подогнать» результаты моделирования под наблюдения [например, Pорова et al., 2013]. Тем не менее, ни одна модель не является совершенной, и ни одно космическое тело не подчиняется в точности ни одному из сценариев. Кроме того, эти модели не позволяют оценить интенсивность ударных волн и вызванные этими волнами эффекты на поверхности.

Казалось бы, наилучшие результаты могут быть получены путем математического моделирования – численного решения уравнений радиационной газовой динамики, описывающих обтекание космического тела атмосферным газом. Такие задачи решались многократно, хотя и с разной степенью точности. Однако существует несколько проблем, которые ограничивают возможности численного моделирования. Во-первых, корректное описание разрушения и последующей деформации разрушенного тела возможно только для «идеальных» объектов, прочностные свойства которых хорошо известны и могут быть описаны известными реологическими соотношениями. Реальные космические тела таковыми не являются и, более того, каждый метеороид по-своему уникален. Во-вторых, оптические свойства метеороидов тоже заранее неизвестны. В-третьих, для аккуратного описания сверхзвукового потока вокруг тела размер вычислительных ячеек должен быть много

меньше размера самого тела (в 10–50 раз). При этом длина траектории в атмосфере может составлять сотни километров (как в случае ЧМ), то есть размер требуемой разностной сетки и время вычислений выходят за пределы возможностей современных компьютеров и вряд ли могут быть оправданы, принимая во внимание указанные неопределенности физической модели. Именно поэтому первый подход является наиболее целесообразным, если нужны быстрые оценки, а второй (часто, с существенными упрощениями постановки задачи) может быть использован для выяснения таких деталей, как избыточное давление и скорость «ветра» на поверхности [см. статью Шувалова и др., 2014, этот сборник].

Челябинское падение – основные факты

Событие 15.02.2013, Челябинский болид, выделяется в ряду других болидных явлений, прежде всего наличием большой области разрушений, но, кроме того, большим количеством разнообразных данных: огромным числом любительских видео и фото съемок, регистрацией оптического излучения и пылевого следа спутниковыми системами наблюдений, многочисленными записями инфразвуковых и сейсмических сигналов, описанием поля рассеяния метеоритов.

Видеозаписи пролета болида были сделаны в большом числе населенных пунктов, которые разбросаны на протяжении 540 км с севера на юг от Нижнего Тагила до города Карталы и на 900–1000 км с запада на восток (от Самары, Оренбурга до Тюмени) [Емельяненко и др., 2013]. Анализ видеозаписей позволил целому ряду авторов определить траекторию пролета болида [Borovička et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Poroova et al., 2013]. Эта траектория согласуется также с траекторией, определенной на основе снимков следа болида спутниками Meteosat [Miller et al., 2013].

Общая картина Челябинского события хорошо установлена [Емельяненко и др., 2013]. Утром 15 февраля, примерно в 09.20 местного времени, в районе г. Челябинска (Россия) в атмосферу Земли под углом менее 20 градусов к горизонту вошло космическое тело размером 16–19 м. Сближение с Землей объекта достаточно внушительных размеров прошло не замеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными телами. И только после его вторжения в атмосферу произошли явления, которые вызвали разрушения и привлекли внимание широкой общественности. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (болид). Через несколько секунд начался значительный рост яркости, максимальная вспышка произошла примерно через 11–12 секунд после начального появления болида. По сообщениям очевидцев, в момент максимальной вспышки свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки, и после нее в небе был хорошо виден след от болида. Через несколько минут (в зависимости от расстояния до траектории) на поверхность земли пришла взрывная волна (то есть ударная волна, вызванная преобразованием кинетической энергии тела в тепловую при его торможении). По сообщению МЧС разрушения от взрывной волны были зафиксированы в Челябинске и десяти районах области. Самые большие разрушения имели место в Челябинске, Коркино, Копейске и поселке Роза. За медицинской помощью обратилось более 1600 человек, госпитализировано 69 человек, из них 13 детей. Большинство из них пострадало от выбитых стекол. Двое пострадавших были помещены в реанимацию. По числу пострадавших падение этого метеорита не имеет аналогов.

Излучение Челябинского болида было очень ярким, он относится к суперболидам, то есть болидам ярче -17 звездной величины. Для Челябинского события были опубликованы координаты места максимальной яркости (54,8N, 61,1E), соответствующая высота и скорость (23,3 км и 18,6 км/с), а чуть позднее – и величина излученной энергии, $3,75 \cdot 10^{14}$ Дж, что соответствует примерно 90 кт ТНТ (<http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>). Координаты места максимальной яркости оказываются не очень далеко от траектории Челябинского метеороида, определенной по видеозаписям [Vogovicka и др., 2013; Popova et al., 2013].

Двадцать инфразвуковых (ИЗ) станций организации по контролю за ядерными вооружениями (СТВТО) зарегистрировали падение Челябинского астероида [LePichon et al., 2013]. Кроме того, ИЗ сигнал был зарегистрирован и другими станциями, в том числе микробарометрами Института динамики геосфер РАН в Москве и геофизической обсерваторией ИДГ РАН «Михнево» (Серпуховской р-н Московской области) [Рыбнов и др., настоящий сборник; Popova et al., 2013].

Сейсмические колебания, вызванные входом болида в атмосферу, были зарегистрированы сейсмическими станциями на расстояниях в сотни и тысячи километров. Предварительно определенные координаты источника сейсмических колебаний (55.150°N, 61.410°E, USGS web-site <http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lra1#summary>) находились достаточно далеко от оцененной траектории полета метеороида.

Более поздние оценки [Tauzin et al., 2013] позволили точнее определить местоположение источника сейсмических возмущений, которое неплохо согласуется с траекторией. Магнитуда соответствующего сейсмического события оценивается в 2,7–4 по разным источникам.

Уроки Челябинского события

С точки зрения проблем астероидной опасности, ЧМ представляет уникальный случай небольшого и весьма типичного ударного события над густонаселенным промышленным районом, наглядно демонстрируя давнюю идею о том, что в XXI веке даже сравнительно небольшие ударные события могут оказаться опасными, так как их действие определяется не только полной энергией ударника, но и свойствами «мишени» [Немчинов и др., 2005]. Другими словами, взаимодействие воздушных УВ с поверхностью или попадание крупных фрагментов в чувствительные точки цивилизации (электростанции, химические заводы, плотины, военные объекты) может привести к катастрофическим последствиям, далеко превосходящим по своим масштабам предсказания по стандартным моделям [Collins et al., 2005]. Необходима разработка базы данных по последствиям ударов, которая включает в себя в качестве входных параметров не только основные доатмосферные параметры метеороидов, но и возможные точки удара.

В современном мире ключевой проблемой является информация. Ее отсутствие может вызвать опасную панику среди населения и привести к неадекватным ответным действиям. Понятно, что падение такого тела, как ЧМ, предсказать заранее или «перехватить» в атмосфере невозможно. Так же невозможно, по-видимому, быстро определить параметры космического объекта. Но исключить техногенные катастрофы в районе с многочисленными потенциально опасными объектами и панику можно за счет своевременного информирования населения и оперативной работы соответствующих служб.

ЧМ выявил и другую серьезную социальную проблему – неготовность людей адекватно реагировать на необычное событие. Астрономия исключена из обязательных школьных программ, а такие вещи, как астероиды и ударные волны, вряд ли изучаются на уроках физики. Даже программы по основам безопасности жизнедеятельности (ОБЖ) уделяют минимальное внимание техногенным катастрофам (1 урок, четыре страницы в учебнике). Поколение, выросшее в годы холодной войны, когда угроза применения ядерного оружия была реальной, знало, что делать, если за окном происходит необычно яркая вспышка. После пролета ЧМ тысячи людей пострадали только потому, что бросились к окнам выяснять причины такой вспышки. К сожалению, не удалось организовать и грамотный сбор бесценного метеоритного вещества, большую часть которого собрали местные жители, не составляя описания, не сохраняя данные о месте находки и массе экземпляра. А сообщения местных правоохранительных органов о незаконности (и даже опасности) сбора этого вещества вынудило жителей скрывать от ученых собранные коллекции, что привело к значительной потере информации о поле рассеяния метеорита.

С точки зрения изучения метеоритных явлений главными особенностями ЧС являются его размер (события такого масштаба происходят по меркам человеческой жизни редко, примерно раз в 50–100 лет) и множество полученных наблюдательных данных. Анализ этого явления позволяет проверить уже существующие физические и математические модели входа в атмосферу сравнительно небольших космических тел (10–100 м в диаметре). Ранее единственным примером такого события была Тунгуска 1908 года [Vasilyev, 1998] с очень ограниченным количеством научных наблюдений, оставляющим широкий простор для квазинаучных спекуляций. Опубликованные в этом сборнике статьи [Шувалов и др.; Иванов; Светцов и Шувалов] демонстрируют работоспособность существующих физических моделей и надежность реализующих их численных методов. Упрощенные методы расчета пролета метеороидов с учетом торможения, абляции и фрагментации [Ророва et al., 2013; Borovicka et al., 2013; Попова и др., этот сборник] также подтвердили свое соответствие реальности. Однако сравнение моделей с конкретным событием выявило некоторые проблемы, к которым относятся следующие:

1. Количество собранного материала ЧМ оказалось незначительным по сравнению с теоретическими оценками. В большинстве случаев, когда была определена масса тела, доля собранного вещества лежит в диапазоне 0,1–10% от начальной массы метеорного тела, что соответствует наиболее употребительной модели. Но для некоторых крупных метеороидов, в том числе и для ЧМ, она составляла только 0,01–0,02% [Ророва et al., 2011]. По-видимому, «стандартные» модели нуждаются в доработке, так как они либо рассматривают движение фрагментов как независимое друг от друга, либо описывают многочисленные мельчайшие фрагменты в приближении «блинной» модели, в то время как для крупных объектов «коллективные» эффекты (например, мелкая пыль в горячем следе крупного фрагмента) могут стать преобладающими. Моделирование движения совокупности целых относительно крупных фрагментов, мелких частиц и пара представляет из себя серьезную проблему, которую еще предстоит решить.

2. Во всех моделях, опубликованных в данном сборнике, излучение или не учитывается совсем, или трактуется приближенно. Неравновесные процессы диссоциации и ионизации не рассматриваются, а отсутствие подробных коэффициентов поглощения вещества космического тела не позволяет получить детальный спектр его излучения.

3. Процесс абляции космического тела трактуется как испарение твердого фрагмента под действием падающего на него излучения, рождающегося в ударно-сжатом слое. Между тем, при абляции происходит плавление и отрыв мелких частиц, что приводит к снижению эффективной энергии, необходимой для испарения и, следовательно, к более интенсивной абляции.

4. Предложенная и описанная в данном сборнике новая модель возникновения электрофонных шумов требует экспериментального подтверждения и дальнейшего теоретического развития.

Эти проблемы определяют направления дальнейших исследований Челябинского события и других метеорных явлений.

Литература

Григорян С.С. Движение и разрушение метеоритов в планетных атмосферах // Космические исследования. 1979. V. 17. P. 875–893.

Дивари Н.Б. Явления, сопровождавшие падение метеорного дождя, и его атмосферная траектория // Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 1. С. 26–48.

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013. V. 47. P. 1–16.

Мелов Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.

Назаров М.А., Корина М.И., Барсукова Л.Д. и др. Вещественные следы Тунгусского болида // Геохимия. 1990. № 5. С. 627–639.

Немчинов И.В., Попова О.П. Анализ Сихотэ-Алинского события 1947 г. и его сравнение с явлением 1 февраля 1994 г. // Астрономический вестник. 1997. Т. 31. № 5. С. 458–471.

Немчинов И.В., Светцов В.В., Шувалов В.В. Основные факторы астероидной опасности. Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 12–61.

Светцов В.В. Загадки кратерного поля Сихотэ-Алиня // Астрономический вестник. 1998. Т. 32. № 1. С. 76–88.

Светцов В.В., Шувалов В.В. Тунгусская катастрофа 30 июня 1908 г. Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 167–199.

Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: о роли физических наук в решении проблемы / УФН. 2011. Т. 181. С. 1104–1108.

Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction // Science. 1980. V. 208. P. 1095–1108.

Artemieva N.A. and Shuvalov V.V. Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // Journal of Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 3297–3310.

Artemieva N.A. and Shuvalov V.V. Tunguska explosion – final remarks // Lunar and Planetary Science Conference 41. 2010. Abstract, 1268.

Binzel R.P. The Torino Impact Hazard Scale // Planetary and Space Science. 2000. V. 48. No. 4. P. 297–303.

Borovička J. and 6 co-authors. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503. P. 235–237.

Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. 2002. V. 420. P. 294–296.

- Brown P.G. and 32 co-authors.* A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // *Nature*. 2013. V. 503. P. 238–241.
- Chyba C.F., Thomas P.J., and Zahnle K.J.* The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. V. 361. P. 40–44.
- Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A.* Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // *Meteoritics and Planetary Science*. 2005. V. 40. P. 817–840.
- Fries M. and Fries J.* Doppler weather radar as a meteorite recovery tool // *Meteoritics and Planetary Science*. 2010. V. 45. P. 1476–1487.
- Glasstone S., Dolan P.J.* The Effects of Nuclear Weapons, 3rd edition. Washington, DC: United States Department of Defense and Department of Energy, 1977. 653 p.
- Halliday I., Griffin A.A., Blackwell A.T.* Detailed data for 259 fireballs from the Canadian camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids // *Meteoritics and Planetary Science*. 1996. V. 31. P. 185–217.
- Hildebrand A.R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo-Z.A., Jacobsen S.B., Boynton W.V.* Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico // *Geology*. 1991. V. 19. P. 867–870.
- Hou Q.L., Kolesnikov E.M., Xie L.W. and 3 co-authors.* Discovery of probable Tunguska cosmic body material: anomalies of platinum group elements and rare-earth elements in peat near the Explosion Site / (1908) // *Planetary Space Science*. 2000. V. 48. P. 1447–1455.
- Ivanov B.A., Petaev M.* Mass and Impact Velocity of the Meteorite Formed the Sterlitamak Crater in 1990 // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference. V. 23. P. 573.
- Jenniskens P., Shaddad M. H., Numan D. and 32 co-authors.* The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // *Nature*. 2009. V. 458. P. 485–488.
- Klekociuk A.R., Brown P.G., Pack D.W. and 6 co-authors.* Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid // *Nature*. 2005. V. 436. P. 1132–1135.
- Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., and N. Brachet.* Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 3732–3737.
- McCrosky R.E., Shao C.-Y., Posen A.* Prairie network fireball. I – General information and orbits // *Meteoritika*. 1978. No. 37. P. 44–59.
- Miller S.D., Straka W.C., Bachmeier A.S., Schmit T.J., Partain P.T., Noh Y.-J.* Earth-viewing Satellite Perspectives on the Chelyabinsk Meteor Event // *PNAS*. 2013; DOI 10.1073/pnas.1307965110.
- Nemchinov I. et al.* Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // *Icarus*. 1997. V. 130. P. 259–274.
- Neukum G., Ivanov B.A.* Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial planet? And asteroid cratering data // In: *Hazards due to Comets and Asteroids* (ed. T. Gehrels). Tucson, London. Univ. Arizona Press, 1994. P. 359–416.
- Oberst J., Molau S., Heinlein D. et al.* The «European Fireball Network»: current status and future prospects // *Meteoritics and Planetary Science*. 1998. V. 33. P. 49–56.
- Passey Q.R. and Melosh H.J.* Effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*. 1980. V. 42. P. 211–233.
- Popova O., Borovička J., Hartmann W.K. et al.* Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // *Meteoritics and Planetary Science*. 2011. V. 46. P. 1525–1550.
- Popova O.P. and 59 co-authors.* Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite Recovery, and characterization // *Science*. 2013. V. 342. P. 1069–1073.
- Portnyagin Y.I., Solovjova T.V.* Global empirical wind model for the upper mesosphere/lower thermosphere // *Ann. Geophysicae*. 2000. V. 18. P. 300–315.
- Schulte P. and 40 co-authors.* The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary // *Science*. V. 327. P. 1214–1218.
- Shaddad M.H. and 19 co-authors.* The recovery of asteroid 2008 TC₃ // *Meteoritics and Planetary Science*. 2010. V. 45. P. 1557–1589.

- Shuvalov V.V.* Atmospheric plumes created by meteoroids impacting the Earth // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. P. 5877–5890.
- Shuvalov V.V. and Artemieva N.A.* Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planetary and Space Science. 2002. V. 50. P. 181–192.
- Svetsov V.V.* Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion // Nature. 1996. V. 383. P. 697–699.
- Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C., Worden S.P., and Erlich A.* Hazards due to Comets and Asteroids (ed. Gehrels, T.) // Tucson: Univ. Arizona Press, 1994. P. 199–221.
- Tancredi G. and 15 co-authors.* A meteorite crater on Earth formed on September 15, 2007: The Carancas hypervelocity impact // Meteoritics and Planetary Science. V. 44. P. 1967–1984.
- Tauzin B., Debayle E., Quantin C., Coltice N.* Seismo-acoustic coupling induced by the breakup of the 15 Feb 2013 Chelyabinsk Meteor // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 3522–3526
- Toon O.B., Zahnle K., Morrison D., Turco R.P., Covey C.* Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // Reviews of Geophysics. 1997. V. 35. P. 41–78.
- Towner M.C. and 6 co-authors.* Towards a Digital Desert Fireball Network for Meteorite Recovery // 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society, held August 12–17, 2012 in Cairns, Australia. Published in Meteoritics and Planetary Science Supplement. 2012. A. 5123.
- Vasilyev N.V.* The Tunguska Meteorite problem today // Planetary and Space Science. 1998. V. 46. P. 129–150.