

АТМОСФЕРНЫЙ ШЛЕЙФ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

Н.А. Артемьева, В.В. Шувалов

Одним из наиболее длительных явлений после 10-секундного болида при пролете Челябинского метеорита (далее – ЧМ) был шлейф, оставленный метеороидом в атмосфере. Этот след напоминал гигантский инверсионный след самолета, был хорошо виден над Уралом в течение получаса, постепенно размывался ветрами и дрейфовал на юг и позднее – на восток. Именно его можно увидеть на большинстве фотографий события. В статье описывается численное моделирование шлейфа в течение первых 3 минут после пролета метеороида. Результаты сравниваются с наблюдениями. Анализируется возможность образования баллистического плюма при небольших ударах.

Введение

Существует два вида шлейфов, оставляемых метеороидами при пролете в атмосфере. Первый – ионизационный – связан со свечением горячего воздуха и паров в следе. Обычно такие шлейфы хорошо видно в темное время суток. Продолжительность свечения очень невелика, всего несколько секунд, так как воздух и пары быстро остывают при расширении. Другой шлейф – аналог инверсионного следа самолета – связан с абляцией и фрагментацией метеороида. Мельчайшие частицы быстро тормозятся в атмосфере, отстают от основного тела, перемешиваются с окружающим воздухом и рассеивают падающий на них свет. Такие шлейфы наблюдаются, как правило, только при достаточно крупных событиях (иначе концентрация частиц очень мала), лучше всего – на фоне слабо освещенного неба, т.е. во время заката или восхода.

Описание метода и начальные условия

Для решения трехмерных уравнений, описывающих эволюцию следа в атмосфере, использовалась программа SOVA [Shuvalov, 1999]. Ось X была направлена вдоль траектории, Z – ей перпендикулярно в плоскости траектории, Y – перпендикулярно этой плоскости. Размер сетки составлял $800 \times 140 \times 340$ ячеек; минимальный шаг – от 100 до 200 м (в зависимости от варианта) в центральной области с увеличением до 500 м на краях сетки. Материал следа описывался двумя разными способами: как сплошное вещество, описываемое уравнением состояния воздуха, или как набор частиц разного размера, которые могут обмениваться моментом и энергией с атмосферой.

Идеальными начальными условиями для моделирования шлейфа могли бы быть данные по пространственному распределению паров и горячего воздуха в следе метеороида, их перемешивание, остывание и конденсация. Или хотя бы независимые распределения массы и энергии частиц метеороида в атмосфере (если энергия известна по наблюдениям, то о массе можно судить только по оценкам интенсивности абляции, которая сильно зависит от плохо известных параметров). Частицы и газ при этом могут иметь разные температуры и скорости. В данной работе использовались два упрощенных подхода.

В первом случае (вариант I) материал метеороида рассматривается как отдельное вещество, которое описывается тем же уравнением состояния (то есть это смесь воздуха с другим веществом малой концентрации). Начальная энергия вещества шлейфа распределена по высоте согласно кривой энерговыделения [Brown et al., 2013]. Избыточная масса на данной высоте тоже пропорциональна энергии, а полная избыточная масса равна доатмосферной массе метеороида, то есть 10^7 кг. Определить реальную массу частиц метеороида в шлейфе невозможно, но полная масса найденных метеоритов пренебрежима мала по сравнению с начальной массой метеороида, поэтому можно считать, что все вещество осталось в шлейфе. Скорость вещества в начальный момент времени равна нулю. На заданной высоте масса и энергия распределены равномерно внутри цилиндра с радиусом 300 или 600 м. Такая постановка задачи близка к постановке, использованной для расчета ударных волн ЧМ ([Шувалов и др., 2014], этот сборник), за исключением того, что вводилось дополнительное вещество (то есть в атмосфере распределялась не только энергия, но и масса). Нетрудно показать, что эта избыточная масса много меньше массы атмосферы в цилиндре такого же размера: на длине траектории от 20 до 50 км, где

произошло выделение всей энергии ЧМ, масса атмосферы в 80 или 320 раз (радиус цилиндра 300 или 600 м, соответственно) больше полной массы ЧМ.

Во втором случае (II) те же самые распределения массы и энергии были приписаны частицам разного размера. Распределение частиц по размерам задавалось стандартным экспоненциальным распределением: $N_{>m} = Cm^{-b}$, где $N_{>m}$ – число частиц с массой больше массы m , C – константа, определяемая по полной массе частиц, b – показатель экспоненты. Всего рассматривалось 6 классов частиц, в каждом последующем классе размер частиц был меньше на порядок. Диаметр самых крупных частиц был 10 см, самых мелких – 0,1 мкм. Если показатель экспоненты $b < 1$, то в распределении преобладают крупные частицы, если $b > 1$ – мелкие. Моделировались два распределения: (IIa) при $b = 0,8$, 75% по массе составляют частицы >1 см, и только 0,375% – частицы диаметром меньше 10 мкм); (IIb) при $b = 1,2$, когда ситуация противоположная, частиц размером больше 1 см – 0,075%, 10-микронных (и меньше) частиц – 94%. Считалось, что частицы и окружающий атмосферный газ находятся в термодинамическом равновесии, а их скорость равна 0. Пробный вариант (IIc) аналогичен варианту (IIb) с точки зрения распределения частиц по размерам, но вся энергия приписывалась кинетической энергии частиц метеороида, а воздух нагревался в результате торможения этих частиц.

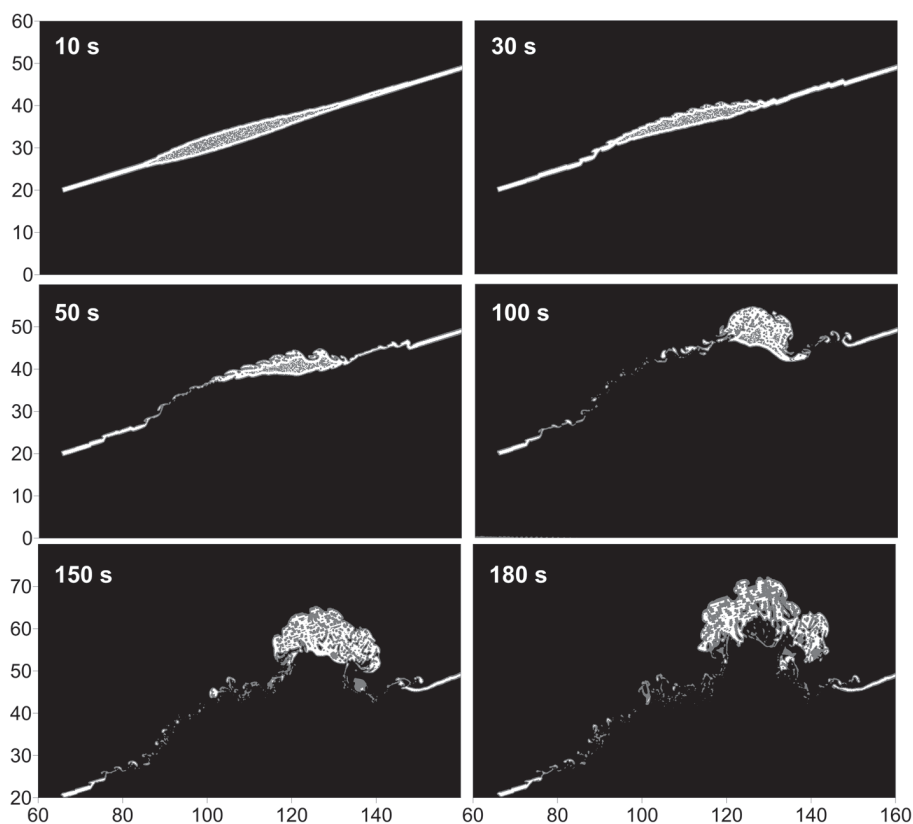
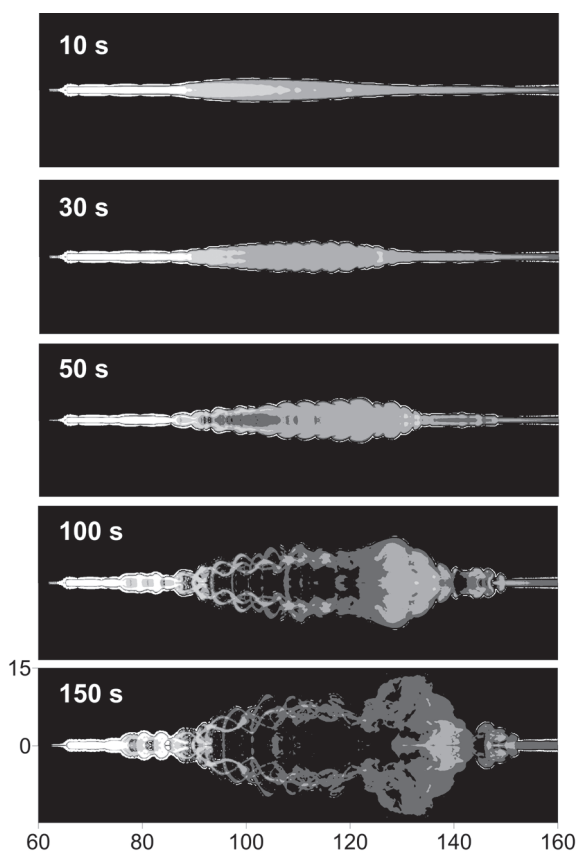


Рис. 1. Эволюция следа в варианте I (вид сбоку) – показана плоскость траектории метеороида, расстояния вдоль траектории и по высоте – в км. Атмосфера показана черным цветом, вещество метеороида – градациями от белого к серому, в зависимости от концентрации вещества метеороида

Эволюция шлейфа

На рисунках 1 и 2 показана эволюция шлейфа во времени для варианта I (материал шлейфа – контрастное вещество с уравнением состояния воздуха). Сначала шлейф быстро расширяется на высотах 25–35 км (где выделилась почти вся энергия метеороида) и начинает всплывать вверх и вдоль следа метеороида (30 секунд). Примерно через 50 секунд на верхней кромке развиваются неустойчивости Рэлея-Тейлора (вещество шлейфа имеет меньшую плотность, чем окружающая атмосфера) и Кельвина-Гельмгольца (из-за наличия в начальный момент небольшой скорости вдоль траектории). Утолщенная часть шлейфа превращается в массивное кучевое облако, которое медленно всплывает на высоту до 70 км (180 секунд), при этом остальная часть шлейфа практически неподвижна и только медленно рассеивается. Продолжать расчеты на большие времена нет смысла, так как влияние местных ветров становится преобладающим. На рис. 2 хорошо видно раздвоение следа, аналогичное образованию тора при всплытии горячего пузыря, но при всплытии цилиндра образуются два цилиндрических вихря. Наблюдавшееся раздвоение шлейфа происходило, видимо, по двум причинам: в первую очередь из-за обтекания всплывающего следа окружающим воздухом и, во-вторых, из-за того, что крупные фрагменты могли образовывать собственные шлейфы (этот процесс при моделировании не учитывался), которые тоже могли позднее раздвигаться. Реальное раздвоение следа происходило заметно быстрее, чем в модели, в течение

Рис. 2. Тот же шлейф, что и на рис. 1 (вид снизу). Расстояния – в км. Видно развитие неустойчивостей и раздвоение следа в его центральной части. Оттенки серого соответствуют полной массе вещества метеороида вдоль вертикального луча. Белый цвет в нижней части траектории является артефактом, так как все вещество внутри цилиндра заменялось другим материалом, а на малых высотах плотность атмосферы становится существенной



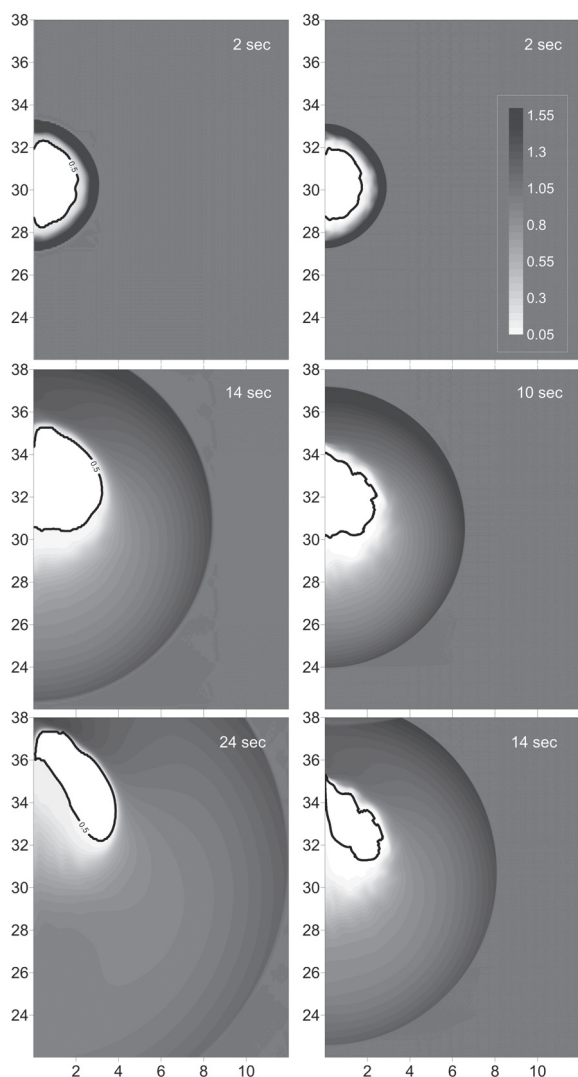


Рис. 3. Образование всплывающего торообразного облака после точечного взрыва мощностью 440 ктон на высоте 30 км. Показана относительная плотность воздуха (шкала на верхнем правом рисунке) и границы материала шлейфа (черная толстая линия). Рисунки слева показывают эволюцию сферической области радиусом 300 м, где в начальный момент времени выделилась вся энергия; размер вычислительной ячейки 30 м (10 ячеек на начальный радиус). Справа – размер начального возмущения 100 метров и размер ячейки 10 м (те же 10 ячеек на радиус). Сравнивая УВ в момент времени 14 секунд, можно сказать, что распространение ударных волн не зависит ни от размера начальной области, которая быстро размывается на 2 км по радиусу (момент времени 2 сек), ни от разрешающей способности вычислительной сетки. А вот форма облака зависит – при более высоком разрешении (справа) облако превращается в тор через 14 сек, а при низком – через 24 сек. Следует отметить, что разрешение в расчетах реального трехмерного следа было еще ниже

нескольких секунд (например, рис. S20 в статье [Porova et al., 2013]). Возможными причинами такого расхождения может быть либо сильное начальное размывание следа (300 м по радиусу против нескольких десятков метров в действительности), либо низкая разрешающая способность вычислительной сетки. Рис. 3 иллюстрирует влияние пространственного разрешения и начального размера облака на развитие неустойчивостей и образование всплывающего тора на примере точечного взрыва на высоте 30 км с энергией 440 кт. По-видимому, решающее значение имеет размер вычислительной ячейки.

На рис. 4 сравниваются эволюции двух шлейфов, состоящих из частиц. Слева – преобладают мелкие частицы (Пб), справа – крупные (Па). Для визуализации шлейфа вычислялась оптическая толщина шлейфа вдоль луча, параллельного поверхности. Считалось, что частицы полностью поглощают падающее излучение, то есть оптическая толщина ячейки с размером Dx на Dz равна $Sn_i r_i^2 / Dx Dz$, где n_i – количество частиц сорта i в ячейке, r_i – радиус частиц данного сорта. Так как полная

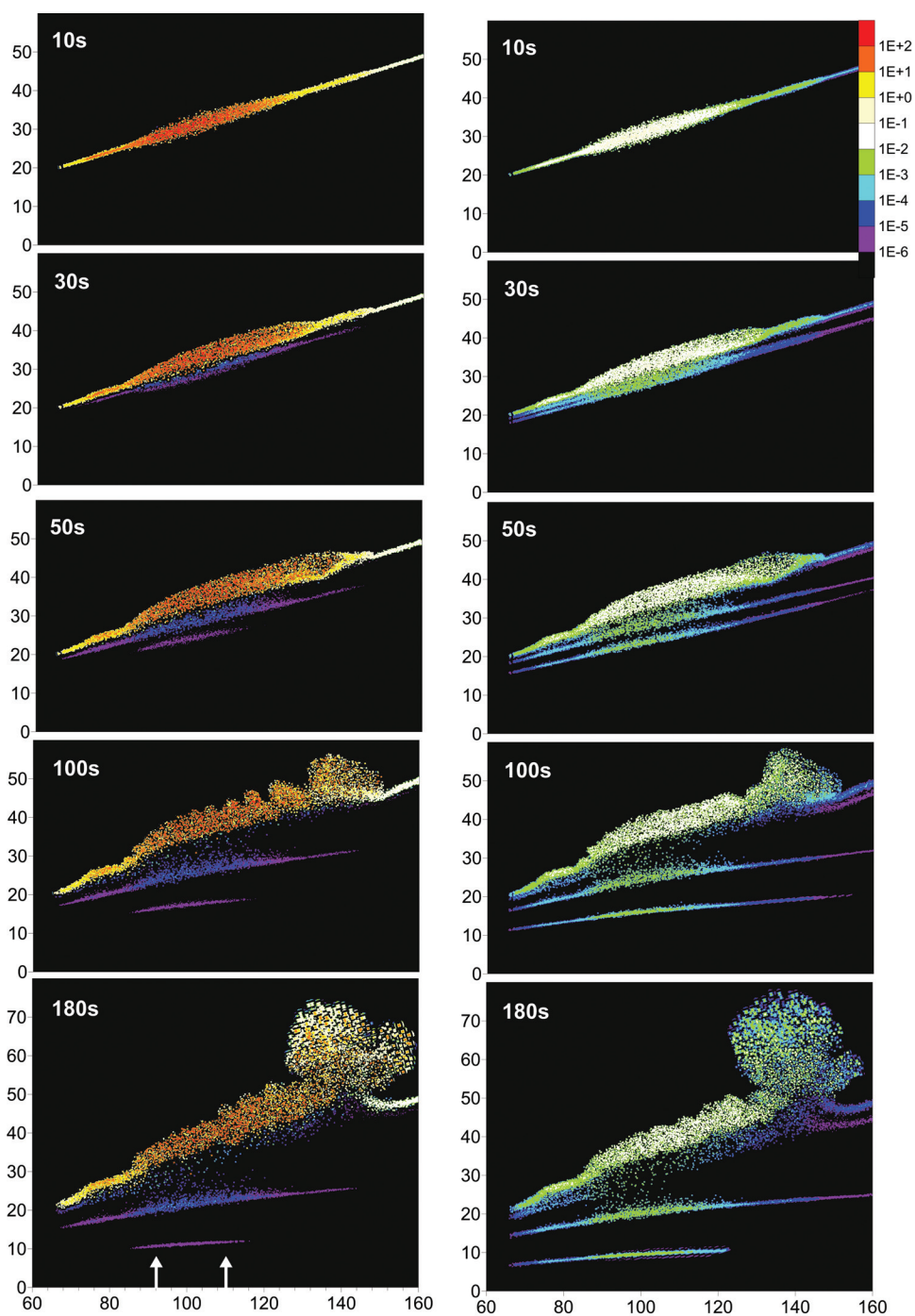


Рис. 4. Эволюция шлейфа, состоящего из частиц размером от нескольких см до долей микрона. В шлейфе слева преобладают мелкие частицы, справа – крупные (см. текст). Показана оптическая толщина вдоль луча, параллельного оси Y . Размеры на осях указаны в км. Белые стрелки на нижнем левом рисунке показывают участок траектории, где произошла самая яркая вспышка и выделилось $\sim 70\%$ энергии метеороида

масса частиц в ячейке пропорциональна $n_i r_i^3$, очевидно, что мелкие частицы (при той же полной массе) поглощают свет эффективнее. Это и видно из рисунка – при одинаковой полной массе частиц шлейф слева имеет оптическую толщину существенно больше 1, то есть он хорошо виден невооруженным глазом. Шлейф справа в начальный момент времени имеет оптическую толщину $<0,1$, которая постепенно уменьшается до значений $<0,01$. Наблюдения за инверсионными следами самолетов показывают, что человеческий глаз может различить след только, если его оптическая толщина $>0,02$ [Kärcher et al., 2009]. Таким образом, шлейф из крупных частиц практически невидим. В целом, эволюция обоих шлейфов одинакова и мало отличается от эволюции шлейфа на рис. 1 – расширение, всплытие, образование неустойчивостей и «кучевого облака» на высотах 50–70 км. Интересным отличием от варианта (I) является разделение шлейфа по высоте на несколько (в правой колонке рис. 4 в момент времени 180 секунд видны четыре). Такое четкое разделение объясняется тем, что использовались дискретные классы частиц, а не непрерывное распределение, которое привело бы к существенному размыванию следа по высоте. В то время как мелкие частицы движутся вместе с воздухом, более крупные начинают выпадать на поверхность. Такое разделение не наблюдалось в действительности только потому, что оптическая толщина «дочерних» шлейфов очень мала.

На рис. 5 показан вид шлейфа для варианта Пс, когда вся энергия переводилась в кинетическую энергию частиц. Этот вариант, хотя и больше всего соответствует реальной картине движения метеороида в атмосфере, получился неудачным при использовании измеренной кривой энерговыделения [Brown et al., 2013] в качестве начальных условий. Пик энерговыделения сместился в сторону меньших высот, так как крупные частицы продолжали двигаться и тормозились на длине траектории порядка нескольких км. Шлейф получился более узким, облако на высотах 50–70 км не образовалось. Единственным положительным итогом этого расчета можно считать рассчитанное положение крупных (1–10 см) фрагментов на поверхности (нижний подшлейф на рисунке) – оно смещено на 10–20 км по направлению движения метеороида по сравнению с максимумом энерговыделения, как и наблюдалось (например, рис. 1 из статьи [Vogovička et al., 2013]). В расчете Пб место выпадения крупных фрагментов находится точно под точкой максимального энерговыделения (что и понятно, так как скорость фрагментов в начальный момент времени считалась равной нулю). Для улучшения расчетов в такой постановке необходимы начальные данные не в виде зависимости энергии от высоты, а в виде распределения фрагментов разного размера по высоте, подгоняемые методом проб и ошибок под наблюдавшуюся кривую энерговыделения.

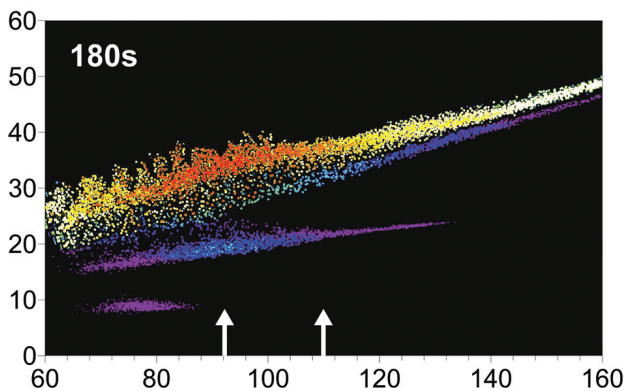


Рис. 5. Шлейф для варианта Пс (вся энергия была переведена в кинетическую энергию частиц) в момент времени 180 секунд. Сравнить с левой нижней панелью рис. 3

Образование плюма

Важность процесса образования плюма стала очевидной после наблюдения падения кометы Шумейкера-Леви 9 на Юпитер. Плюм представляет собой струйное течение вдоль метеорного следа, вызванное нарушением гидростатического равновесия внутри следа. По законам подобия аналогичные плюмы могут образовываться на Земле для тел размером порядка 10–30 м [Boslough and Crawford, 1997]. При ударах тел меньшего размера на границе следа метеороида и атмосферного воздуха образуются неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, которые вызывают перемешивание вещества следа с окружающим воздухом и подавляют развитие плюма [Shuvalov, 1999]. Даже при вертикальном, наиболее благоприятном для образования плюма угле наклона траектории 20-метрового метеороида, максимальная скорость подъема газа вдоль следа не превышает 300 м/с, а высота всплытия – первых десятков км ([Shuvalov, 1999], рис. 4). Для пологих траекторий с углом наклона α условия для образования плюма еще хуже ввиду меньшего градиента давления P по высоте h , измеряемого вдоль следа ($dP/dh \sim \sin \alpha$). Действительно, образование плюма, то есть направленного движения газа (или смеси газа с частицами) вдоль следа вверх, не наблюдается в наших расчетах или оно очень незначительно (рис. 1, 4, 5). Мы провели расчеты эволюции следа для удара аналогичного ЧМ, но под углом 45° к горизонту, результаты которых показаны на рис. 6. Хотя скорость движения вдоль следа несколько больше, по-прежнему вместо плюма образуется плавучее облако на высоте ~ 80 км. Если при том же угле наклона траектории увеличить еще и полную энергию метеороида в 4 раза, то становится заметным направленное движение газа вдоль следа, а шлейф распадается на две части (рис. 7) – его нижняя часть образует плавучее облако, а верхняя – плюм, который в моменту вре-

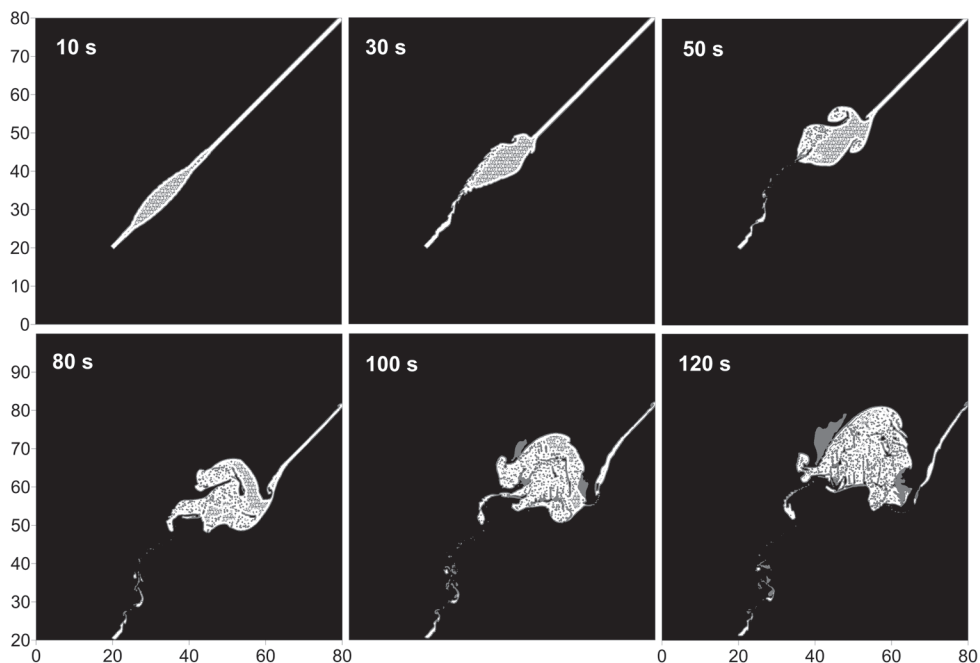


Рис. 6. Развитие шлейфа при угле наклона траектории 45° и том же распределении энергии по высоте

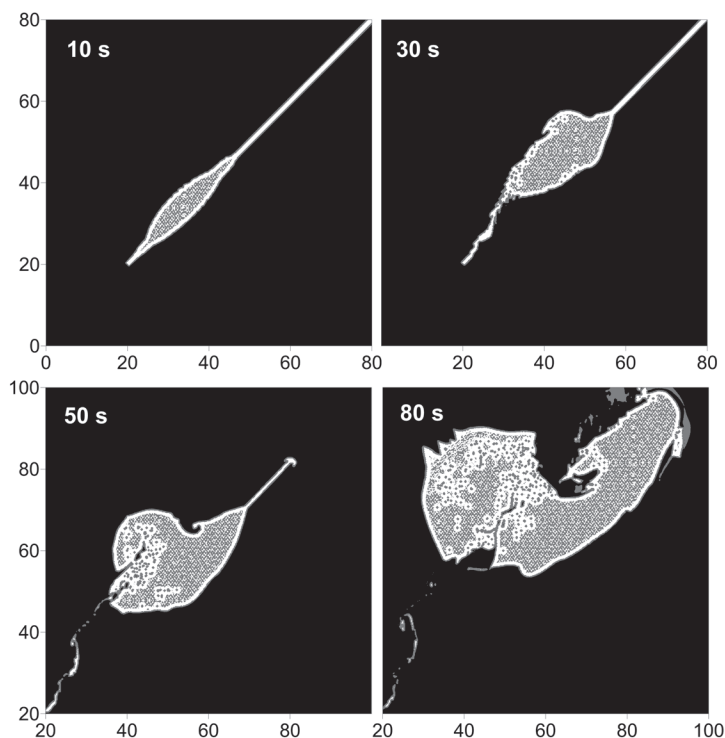


Рис. 7. Развитие шлейфа при угле наклона 45° и в четыре раза большей полной энергии метеороида. Образуется плавающее облако, но часть вещества ускоряется вдоль следа и достигает высоты >100 км (расчеты проводились только до 80 секунд)

мени 80 секунд, то есть гораздо быстрее, чем плавающее облако, достигает высоты 100 км. Следует заметить, что наши расчеты на относительно грубой сетке приводят к заниженным (по размеру метеороида) оценкам, с которых начинается развитие плюма, так как удастся описать только сравнительно «длинно-волновые» возмущения. Возможно, что расчеты на более подробных сетках приведут к тому, что оценка полной энергии метеороида для образования плюма будет еще выше, чем 2 мт. С другой стороны уточнение абляции и начальных параметров (температуры и прочности) в следе могут несколько уменьшить критический для образования плюма размер метеороида.

Обсуждение шлейфов

Наблюдавшиеся ранее шлейфы метеороидов

Наиболее ярким, хотя и наименее достоверным, примером шлейфа является шлейф Сихоте-Алиньского метеорита, изображенный на известной картине Н. Медведова (рис. 8,а). Если доверять художнику – свидетелю падения метеорита, то можно сделать вывод, что шлейф практически достиг поверхности земли, то есть метеороид затормозился и перестал испаряться намного ниже, чем в случае ЧМ. Действительно, расчеты показывают, что конечные скорости самых крупных craterобразующих фрагментов Сихоте-Алиньского метеорита достигали 2–4 км/с.

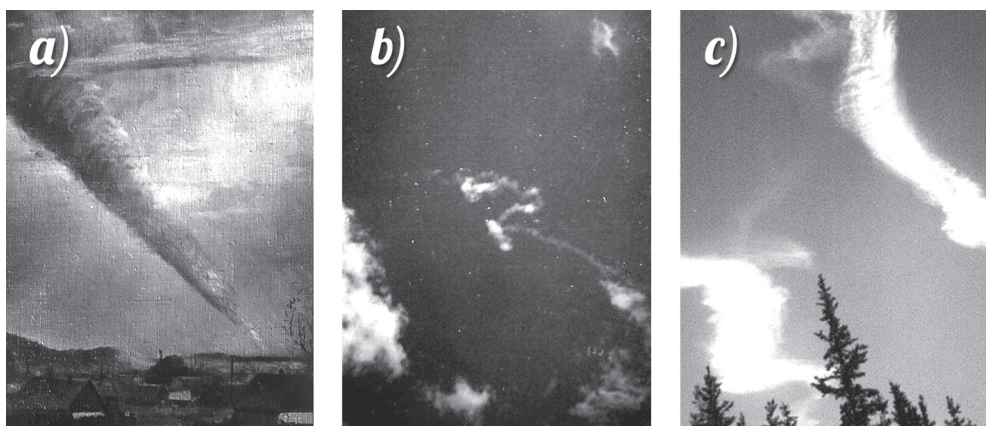


Рис. 8. Шлейфы крупных метеороидов: А) Сихоте-Алиньского метеорита 1947 г. (репродукция картины Медведева; В) Каранкаса 2007 г.; С) Тагиш Лэйк 2000 г.

А даже самый большой фрагмент ЧМ достиг поверхности с дозвуковой скоростью, близкой к скорости свободного падения. Противоположный пример – шлейф Каранкаса (слабо виден на снимке (рис. 6,б), который сделан через 5–7 минут после падения метеорита, образовавшего 13-метровый кратер). Очевидно, шлейф находится на достаточно большой высоте, а не у поверхности, то есть, скорее всего, скорость упавшего фрагмента была небольшой. Шлейф метеороида Тагиш Лэйк (Tagish Lake) с до атмосферной массой около 56 тонн напоминал серебристые облака, которые можно было наблюдать в течение 12 часов после падения метеорита, хотя сильные ветры привели к заметному размыванию шлейфа уже через 3 минуты [Hildebrand et al., 2006] – рис. 6,с.

Измерение размера частиц в следе

3 сентября 2004 г. в атмосферу Земли вошел метеороид, пролет и разрушение которого над Антарктидой были зарегистрированы инфракрасными детекторами геостационарных спутников; полная энергия была оценена в 13 кт ТНТ, а полная масса до входа в атмосферу – в $0,65 \cdot 10^6$ кг [Klekociuk et al., 2005]. Через 7,5 часов после события и на расстоянии 2700 км к востоку лидары обнаружили в стратосфере, на высотах 28–32 км, два облака продуктов абляции и разрушения, которые находились выше и были «теплее», чем обычные приполярные стратосферные облака. Размер частиц в нижнем облаке мог достигать 10–20 мкм, в верхнем – был порядка 0,3–1,1 мкм [Klekociuk et al., 2005]. Эти размеры существенно больше, чем теоретические расчеты, предполагающие конденсацию и коагуляцию продуктов абляции в нано-метровые частицы. Аналогичные оценки по размерам существуют и для шлейфов метеороида Тагиш-Лэйк [Hildebrand et al., 2006] и Алмахата-Ситта [Almahata-Sitta, Borovička and Charvát, 2009].

Сравнение с инверсионным следом самолета и серебристыми облаками

Инверсионные следы самолетов возникают в результате конденсации паров воды, которые, наряду с углекислым газом, образуются при сгорании топлива в ре-

активном двигателе. Пары воды быстро конденсируются в капли размером порядка микрона, если относительная влажность окружающего воздуха ниже точки насыщения (поэтому инверсионные следы редко образуются на высотах < 8 км). После замерзания кристаллы льда продолжают расти и достигают размера в несколько десятков мкм в течение часа. Поперечный размер «старого» следа достигает первых километров, средняя концентрация ледяных кристаллов $\sim 3,5 \text{ см}^{-3}$, а оптическая толщина варьируется в широких пределах от 0,001 до 0,5 [Kärcher et al., 2009]. Время существования следа определяется локальными метеорологическими условиями и варьируется от первых минут до нескольких часов. Серебристые облака видны только в сумерках на высоких широтах, когда отражают лучи солнца на фоне уже темного неба. Они состоят из гораздо более мелких, < 70 нм, кристаллов льда и находятся на высоте порядка 82 км; концентрация частиц колеблется от 20 до 200 мкг/м² [Thomas and McKay, 1984].

Дальнейшая эволюция следа в атмосфере

Шлейф от ЧМ был обнаружен датчиками, установленными на борту японо-американского спутника и предназначенными для распознавания озона и аэрозолей в атмосфере Земли на средних высотах (25–45 км) и средних широтах (50–70°) северной широты [Gorkavyi et al., 2013]. Первый раз шлейф был зарегистрирован через три с половиной часа после пролета метеороида в 1000 км к востоку от Челябинска, примерно над Новосибирском. Уже через несколько дней шлейф образовал кольцо вокруг Земли на широтах 55–60° и на высотах от 30 до 40 км (см. рис. 9). В последующие месяцы шлейф толщиной около 5 км и шириной 300–400 км мед-

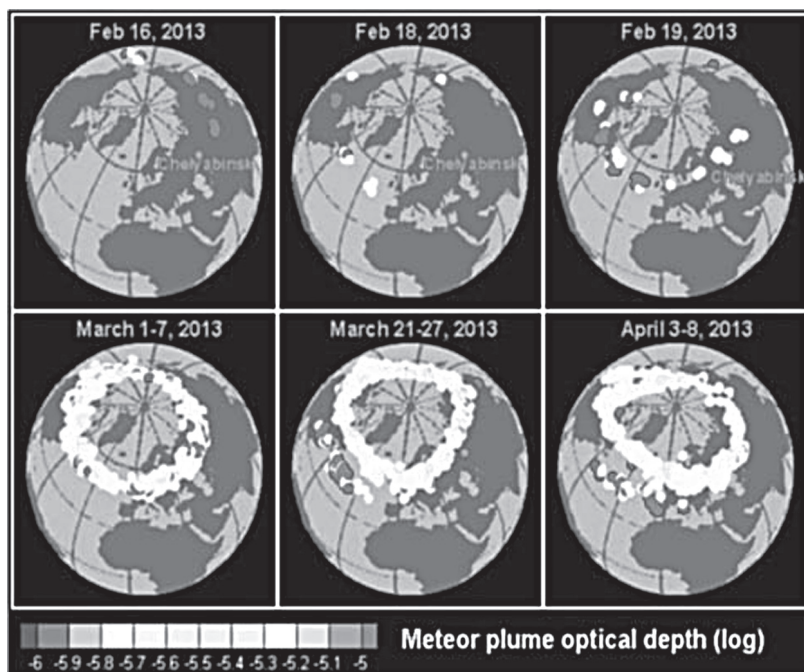


Рис. 9. Эволюция шлейфа в атмосфере с 16 февраля по 8 апреля. Форма шлейфа определяется полярным атмосферным вихрем (из статьи Gorkavyi et al. 2013)

ленно (90 м/день) опускался, а средний размер частиц уменьшался до сотых долей микрона.

Выводы

Численное моделирование позволяет воспроизвести эволюцию шлейфа ЧМ в течение первых 3 минут, то есть до того момента времени, пока влиянием ветра можно пренебречь. Развитие неустойчивостей и раздвоение следа в расчетах происходят медленнее из-за невысокого разрешения вычислительных сеток. По-видимому, основную массу шлейфа даже сразу после его образования составляли микронные частицы (в противном случае шлейф был бы не виден), а через несколько минут вообще все крупные частицы, которые могут быть обнаружены на поверхности как метеориты, отделились от основного шлейфа. Полную массу шлейфа по результатам моделирования определить невозможно, так как при любой начальной массе шлейфа масса частиц существенно меньше массы окружающего горячего воздуха. При ударах масштаба ЧМ образование плюма не происходит ввиду очень пологой траектории и малого начального размера метеороида и, следовательно, диаметра его следа. В отличие от инверсионных следов самолетов, состоящих из кристаллов льда, шлейфы метеороидов состоят из силикатных частиц типичных для метеоритов (оливин, пироксен, железо и его окиси).

Модели можно усовершенствовать, если удастся правильно воспроизвести распределение фрагментов и продуктов абляции по массе и по высоте в качестве начальных условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00309-а).

Литература

Borovička J. and Charvát Z. Meteosat observation of the atmospheric entry of 2008 TC₃ over Sudan and the associated dust cloud // *Astronomy and Astrophysics*. 2009. v. 507, p. 1015–1022.

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

Boslough M.B.E. and Crawford D.A. Shoemaker-Levy 9 and plume-forming collisions on Earth // *Near-Earth Objects*, edited by J.L. Remo. 1997, p. 236–282.

Boslough M.B.E. and G.R. Gladstone. An impact plume model for atmospheric holes in the FUV dayglow // *Geophysical Research Letters*. 1997, v. 24, p. 3117–3120.

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.

Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., Silva A.M.; Dudorov A.E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // *Geophysical Research Letters*. 2013. v. 40, p. 4728–4733.

Hildebrand A.R. and 7 co-authors. The fall and recovery of the Tagish Lake meteorite // *Meteoritics and Planetary Science*. 2006. v. 41, p. 407–431.

Kärcher B., Burkhardt U., Unerstrasser S., Minnis P. Factors controlling contrail cirrus optical depth // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009. v. 9, p. 6229–6254.

Klekociuk A.R. and 8 co-authors. Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid // *Nature*. 2005. v. 436, p. 1132–1135.

Popova O.P. and 59 co-authors. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite Recovery, and characterization // *Science*. 2013, v. 342, Issue 6162, p. 1069–1073.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // *Shock Waves*. 1999. v. 9, No. 6, p. 381–390.

Shuvalov V.V. Atmospheric plumes created by meteoroids impacting the Earth // *Journal of Geophysical Research*. 1999, v. 104, p. 5877–5889.

Thomas G.E. and McKay C.P. On the mean particle size and water content of polar mesospheric clouds // *Planetary Space Science*. 1985. v. 33, p. 1209–1224.