

ВЗРЫВ ЧЕЛЯБИНСКОГО СУПЕРБОЛИДА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ: РЯДОВОЕ СОБЫТИЕ ИЛИ УНИКАЛЬНОЕ СТЕЧЕНИЕ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ?

© 2013 г. В. Е. Фортов*, В. Г. Султанов**, А. В. Шутов**

*Объединенный институт высоких температур РАН

125412, Москва, ул. Ижорская, 13

e-mail: fortov@ras.ru

**Институт проблем химической физики РАН

142432, Московская обл., Черноголовка, пр-кт ак. Н.Н. Семенова, 1

e-mail: sultan@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 20.03.2013 г.

Принята к печати 23.03.2013 г.

Рассматриваются особенности разрушения малых космических тел в атмосферах планет. Проанализированы основные наблюдательные факты Челябинского суперболида: потеря скорости при прохождении верхних слоев атмосферы, прочность и характер разрушения, высота взрыва и энерговыделение. Детально рассмотрены аэродинамические явления, сопровождающих его вход с гиперзвуковой скоростью и разрушение в атмосфере. Даны расчетные оценки прочности исходного метеороида в зависимости от начальной высоты разрушения. Представлены основные результаты по столкновению кометы Шумейкеров–Леви 9 с Юпитером.

Ключевые слова: Челябинский метеорит, фрагментация и разрушение метеоритов, комета Шумейкеров–Леви 9, астероидно-кометная опасность.

DOI: 10.7868/S0016752513070091

1. ВВЕДЕНИЕ

15 февраля 2013 года в 9.20 (7.20 мск) жители Челябинска, а также Свердловской, Курганской, Тюменской областей, части северного Казахстана, стали свидетелями редкого астрономического явления – появление яркого суперболида, перемещающегося в западном направлении. Движение болида сопровождалось несколькими вспышками (воспринимаемых очевидцами как взрывы, из-за раздавшихся через некоторое время сильных хлопков), наиболее яркая из которых длилась по разным данным от 1 до 5 секунд, при этом от нее ощущался жар, сильнее чем от Солнца днем. Несмотря на то, что болид не долетел до Земли, – на текущий момент не обнаружены следы его удара, – он все же смог нанести ущерб, – пришедшая после прохождения болида ударная волна выбила оконные стекла в части домов города Челябинск и окружающих населенных пунктах. Осколками стекла ранено порядка 1500 жителей.

Основной урон пришелся на шесть населенных пунктов Челябинской области: Кманжелинск, Копейск, Коркино, Южноуральск, Челябинск и село Еткуль. Пострадало более 7000 строений, – в основном выбитые стекла, ближе к эпицентру в некоторых домах были выбиты рамы. Ударной волной разрушены крыша и часть стены здания склада концентратов Челябинского цинкового

завода. Повреждены конструкции ледового дворца “Уральская молния”.

Момент взрыва тела зафиксировали американские сейсмологи. 15 февраля в 3 часа 20 минут 26 секунд по Гринвичу наблюдался толчок магнитудой 4 балла примерно в километре к юго-западу от центра Челябинска. Для сравнения, падение Тунгусского метеорита оценивается в 5.0 баллов. Российские сейсмические станции зафиксировали сопутствующее взрыву землетрясение с магнитудой 3.2 в районе Еманжелинска. По оценкам NASA мощность взрыва составила 440 кт ТНТ [1].

После Тунгусского метеорита это первый случай на территории России, когда вторжение болида в атмосферу сопровождалось разрушениями.

И тем не менее, появления суперболидов достаточно нередкое явление [2]. В настоящее время накоплен большой опыт наблюдений, получено много интересной информации по подобного рода событиям. Есть данные не только по составу и структуре подобных тел, остатки которых найдены на земле, но и из анализа наблюдательных данных даны оценки прочности собственно метеорных тел до их разрушения в атмосфере, детально исследован и проанализирован характер их разрушения, в том числе и взрывного, при прохождении атмосферы.

Уникальным в данном событии является то, что впервые оно не просто произошло над густонаселенными районами, но и привело к разрушениям, хотя и незначительным, но с большим числом пострадавших. Далее мы детально рассмотрим, что происходит с телами, подобными Челябинскому метеориту, при входе в атмосферу, — каким образом они разрушаются; дадим оценки его прочности и высоты разрушения.

Есть еще один аспект, который может быть интересен с точки зрения астероидно-кометной опасности для Земли, это столкновение комет с Землей. К счастью в нашей истории мы еще не наблюдали такого явления, — Тунгусский метеорит, несмотря на то, что уже достаточно долгое время его причисляют к телам кометного происхождения, по-прежнему сохраняет свое название, что говорит в общем-то о том, что пока нет убедительных доказательств, что это была комета. И тем не менее, мы имели уникальную возможность наблюдать столкновения кометы Шумейкеров—Леви с Юпитером, которое дало массу уникальной и очень интересной научной информации, на которой мы тоже остановимся в данной работе.

2. ПИПЕРЗВУКОВОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ МЕТОРИТАМИ/АСТЕРОИДАМИ АТМОСФЕРЫ

2.1. Болиды в атмосфере Земли

2.1.1. Фрагментация и разрушение метеороидов в атмосфере. Во время движения в атмосфере большинство метеоритов разрушается, — фрагментируются, под действием аэродинамических сил. Фрагментация обычное явление [2]. На видеозаписи полета болида Пикскил можно увидеть до 70 фрагментов. У метеорита Прштибрам было обнаружено 17 фрагментов. Так же большое количество фрагментов было найдено и при падении других крупных метеоритов Мбала, Зуанзе, Парк Форест.

Рассмотрим некоторые механизмы разрушения относительно небольших космических тел при взаимодействии их с атмосферой. Скорости входа в атмосферу составляют, как правило, десятки км/с. Для достаточно мелких тел (от микрокопических до 1 м в диаметре) абляция поверхностного слоя тела действительно играет заметную роль в изменении его формы и размеров. Среди причин, вызывающих абляцию тела, обычно рассматриваются перенос тепла от ударно-сжатого слоя воздуха к поверхности тела за счет диффузии, молекулярной и электронной теплопроводности, а также излучением горячего воздуха. Однако в классических работах Бронштэна показано, что относительно холодный слой паров перед телом (с температурой порядка температур плавления и испарения) значительно снижает перенос тепла конвективным и радиационным ме-

ханизмами. Основным механизмом абляции тела в этой ситуации оказывается квазинепрерывное дробление, или шелушение тела.

Для крупных объектов (от десятков метров до десятков километров) наиболее существенными оказываются другие виды дробления. Такие тела не успевают потерять скорость и полностью расплавиться и испариться в верхних слоях атмосферы и достигают таких высот, где давление воздуха за ударной волной возрастает до величин порядка прочности материала метеороида.

Под воздействием аэродинамической нагрузки метеорит начинает разрушаться, образующиеся обломки сносятся в стороны и назад, формируя “хвост” из частиц разных размеров, подвергающихся вторичному дроблению под действием скоростного напора и взаимных столкновений. В этом случае можно отметить возникновение аэродинамических сил отталкивания между фрагментами тела, а также эффект коллимации — вытягивания облака фрагментов в цепочку.

Различают два механизма фрагментации. В первом случае исходное тело в процессе движения разделяется на несколько фрагментов, которые движутся далее по направлению общего движения тела, и процесс их взаимодействия с набегающим потоком воздуха можно рассматривать независимо. В этом случае возможно взаимодействие отошедших от частей ударных волн, но оно происходит обычно достаточно далеко позади и не оказывает влияния на характер движения основных тел.

Второй механизм характеризуется наличием облака мелких фрагментов тел движущихся как единое целое, т.е. в этом случае от набегающего на него потока воздуха они отделены единой ударной волной. Такая фрагментация характерна для крупных тел с достаточно малой исходной прочностью. Обычно она происходит на большой высоте (тело быстро разделяется на мелкие фрагменты), что приводит практически к полному разрушению тела.

При дроблении и сносе осколков в стороны резко увеличивается суммарная площадь миделева сечения, что приводит к ускорению торможения тела и возрастанию роли конвективного и радиационного притока тепла к нему. Однако унос массы тела за счет дробления остается несопоставимо большим по сравнению с уносом за счет плавления и испарения.

Дробление тела начинается после достижения давлением газа на его лобовой поверхности разрушающих для материала тела значений по сколовому механизму под действием сжимающих напряжений (от перепада давлений и массовых сил инерции). Начавшееся локально разрушение будет распространяться от лобовой поверхности к тыльной в виде волны дробления. При этом потерявшая связность масса будет растекаться в стороны и сноситься потоком назад. К моменту начала существенной деформации раздробленной

массы за счет растекания все тело уже будет раздроблено и может рассматриваться как несжимаемая жидкость. Такая капля начнет сплющиваться, сжимаясь в продольном направлении и расширяясь в поперечном, причем края ее под действием скоростного напора будут отгибаться назад, принимая медузообразную форму. Конечным итогом будет полное диспергирование и торжование космического объекта.

Описанный процесс происходит быстро и носит взрывной характер, как это и наблюдалось при падении Челябинского метеорита.

На многочисленных видеозаписях хорошо видно, что за несколько секунд до основной вспышки яркость и видимый размер трека болида начали быстро увеличиваться, что говорит о стремительном разрушении тела. Через приблизительно 5 секунд произошло резкое торможение и наблюдалась самая яркая вспышка, взрыв, исходное тело катастрофически разрушилось. Видно также, что отдельные фрагменты смогли продолжить свое движение и “сгорели” немного дальше вследствие тех же причин.

Движение полностью разрушенного тела внутри общей для всех фрагментов ударной волны хорошо описывается в гидродинамическом приближении [3], которое часто используют в аналитических моделях и в математическом моделировании. Этот подход и будет использован далее.

2.1.2. Данные по прочности, высот и характере разрушений наиболее известных болидов. Данные по прочности метеороидов весьма ограничены [2]. Отдельные авторы дают следующие значения прочности: 10–50 МПа для хондритов, 200 МПа для железных тел, для “высохших” (с большой потерей летучих соединений) комет порядка 1 МПа. Однако эффективная прочность большого тела значительно ниже, чем небольшого образца, обычно найденного на месте падения, и представляющего, в силу его способности достичь поверхности, в общем то, наиболее прочную часть исходного тела.

Для определения прочности исходного тела, кроме собственно исследования найденных после падения образцов, используется множество непрямых методик. Мы не будем подробно останавливаться на них, — отошлем читателей к работе [4], где детально собраны и проанализированы данные по 13 ярким болидам, по которым имеются хорошие наблюдательные данные и данные по прочности этих тел мы приводим в виде сводной таблицы 1.

Как видно из таблицы, максимальная прочность в 9.6 МПа наблюдалась у метеора Neuschwanstein. Для сравнения прочность стали на растяжение варьируется от 300 МПа до 1500 МПа, прочность стекла, или ударная вязкость 1–2 кПа. Зафиксированная прочность остальных метеороидов оказалась значительно ниже.

Таблица 1. Известные данные по прочности болидов, сводная таблица по работе [4]

Наименование	Динамическое давление, МПа
Probram	0.9
Lost City	0.7–2.8
Innisfree	0.1–3.0
Peekskill	0.7–1.0
Tagish Lake	0.3–2.2
Moravka	<0.9–2.3
Neuschwanstein	3.6–9.6
Villalbeto de la Pen.	3.9–5.1
Bunburra Rockhole	0.11–0.89
Almahata Sitta	0.3–1.3
Jesenice	0.3–3.9
Grimsby	0.03–3.6

Таким образом, можно сделать кардинальный вывод о весьма низкой прочности метеороидов с размерами более одного метра. Вместе с тем, это не означает что с ростом размеров прочность тела будет все более уменьшаться, т.е. тело размером в 100 метров будет менее прочным, чем тело размером 1 м.

2.2. Челябинский суперболид

2.2.1. Данные наблюдений. По данным NASA [1] 15 февраля в 9:20:20 по местному времени (3:20:20 UTC) метеорит, носящий название Челябинский, вошел в атмосферу Земли в районе границы России с Казахстаном. Он двигался со стороны Солнца в западном направлении. Вследствие малого угла по отношению к Солнцу 15° он не был обнаружен системами по наблюдению за астероидами. Следует отметить и другую возможную причину раннего не обнаружения. Современные телескопы ориентированы на поиск астероидов больше 100 метров (по современным представлениям, начиная с этого размера космические тела могут произвести катастрофические разрушения на Земле) в диаметре, и поэтому проникновение этого тела в атмосферу прошло незамеченным, несмотря на его массивность.

Тринадцать секунд спустя, в 9:20:33 по местному времени (3:20:33 UTC) метеорит, превратившийся к этому времени в яркий болид (яркий огненный шар) на скорости 18.6 км/с, достиг пика своей светимости на высоте 23.3 км, практически прекратив свое существование [1]. На Земле наблюдалось это событие как мощный взрыв, после которого болид продолжил свое движение, но значительно ослабил яркость и через несколько секунд пропал совсем.

Аппаратура, установленная на геостационарных спутниках Министерства обороны и Министерства энергетики США, позволяет не только

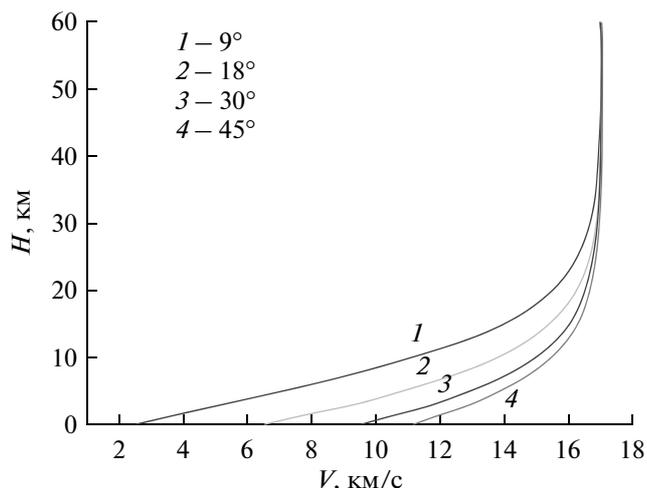


Рис. 1. Изменение скорости метеорита от высоты для 4-х углов входа к горизонту, с учетом уноса массы за счет конвективного и радиационного нагрева [6] для энтальпии уноса массы 4 ккал/г.

отслеживать воздушные ядерные взрывы, так и измерять кривые светимости сгорающих в атмосфере болидов. NASA, используя эти данные по полной светимости суперболида, которая составила $E_0 = 3.75 \times 10^{14}$ Дж или 90 кт, из чего по эмпирической формуле $E = 8.2508 E_0^{0.885}$ [5], оценила полную энергию взрыва болида в 440 кт ТНТ [1]. Этим же источником дается по координатной скорости (+12.8; -13.3; -2.4) в км/с, что позволяет говорить о вертикальной скорости снижения 2.4 км/с.

Используя эти данные была получена оценка массы и среднего размера, которые, при средней плотности равной 3.6 г/см^3 , составили соответственно 11 000 тонн и 18 метров.

2.2.2. Моделирование движения болида в атмосфере. Моделирование движения болидов в атмосферах весьма непростая задача, не только потому, что на характер движения тела оказывают влияние множество факторов: форма и структура тела, про которые в большинстве случаев ничего не известно; потеря (унос) массы; характер разрушения, определяющийся в основном внутренней структурой тела; радиационные потери ("высвет") и многое другое; но и вследствие огромной разницы в характерных размерах самой задачи, — приходится рассматривать движение тел метровых диапазонов, с характерными временами для физических процессов в мкс, на расстояниях более 100 км (10^5 м) и времени движения в атмосфере несколько десятков секунд. Таким образом, мы получаем громадную разницу как в характерных временах (6 порядков), так и в характерных размерах (4–5 порядков). Поэтому на практике, часто прибегают к упрощениям, аналитическим моделям, детальное моделирование проводится для отдельных участков траектории и т.д.

Моделирование в данной работе включало в себя проведение серии расчетов, позволивших оценить прочностные характеристики болида, а также высоты, на которых началось его разрушение. Оценки влияния скорости болида в зависимости от угла входа основаны на аналитических формулах торможения обтекания и уноса массы за счет радиационного и конвективного теплообмена для неразрушающегося метеорита [6, 7].

Характер обтекания сплошного тела, резко увеличение лобового сопротивления при увеличении размеров тела в направлении, перпендикулярном движению рассчитаны с использованием двумерного гидродинамического кода [8], по методу Годунова [9], второго порядка точности по пространству [10], реализованном на подвижных адаптивных криволинейных четырехугольных сетках.

Одномерные расчеты позволили определить примерную высоту начала разрушения метеорита, соответствующую давлению в критической точке тела 5 МПа.

Двумерные расчеты, в которых метеорит моделировался как сферическое тело плотностью 2.9 г/см^3 , со скоростью входа в атмосферу Земли 17 км/с, что согласно последним данным [1], является весьма хорошим приближением для исследуемого события, дают подробную картину обтекания тела на заданной высоте для заданной скорости.

2.2.3. Основные результаты. Оценка прочности метеорита и вероятных разрушений. Высота максимального торможения для сферического метеорита, согласно [7] Z_m , соответствующие динамическое давление в критической точке тела P_m и скорость тела V_m равны:

$$Z_m = h \ln(h\rho_0/(\beta \sin(\Theta))), \quad (1)$$

$$P_m = \rho(Z_m)V(Z_m)^2 = \beta \sin(\Theta)V_c^2/(eh), \quad (2)$$

$$V_m = V(Z_m), \quad (3)$$

где $\beta = 4/3\rho_e R$, ρ_e — плотность метеорита, R — радиус метеорита, h — шкала высот. Для Земли $h = 6.7 \text{ км}$.

Плотность атмосферы $\rho(z) = \rho_0 \exp(-z/h)$, z — высота над уровнем моря. ρ_0 — условная плотность на поверхности земли ($\rho_0 = 0.00175 \text{ г/см}^3$).

На рис. 1–3, представлены результаты расчетов торможения тела в зависимости от угла входа. Рис. 2 хорошо иллюстрирует тот факт, что чем больше угол вхождения метеороидных тел в атмосферу, тем большим динамическим нагрузкам они подвергаются, и процесс разрушения (см. выше) происходит на больших высотах. Можно даже сказать, что одной из причин продвижения Челябинского метеорита так глубоко в атмосферу Земли, это очень пологий угол его входа. Выше мы приводили данные по скорости вхождения. Из них следует, что угол атаки составлял порядка 5.2° к горизонту. Далее (рис. 4, 5) приводятся результаты рас-

четов для этого угла входа метеороида в атмосферу.

Анализируя рис. 5 и обращая внимание на то, что на видеозаписях трек начал расширяться задолго до самого взрыва, ориентировочно секунд за 5, что, при скорости снижения 2.4 км/с, дает нам высоту начала разрушения тела порядка 35 км.

В таблице 2 приведены результаты расчетов обтекания метеорита, вычисленные с учетом и без уноса массы.

Таким образом, по результатам расчетов можно сделать вывод, что реальная прочность Челябинского метеорита не превышала 5 МПа. И скорее всего она была значительно меньше, трек, причем достаточно яркий, что говорит о его большой абсолютной ширине, от болида наблюдался задолго до самого взрыва, а значит реальный процесс разрушения начался задолго до этого, на высотах от 40 до 50 км, что дает нам прочность менее одного МПа.

Ниже приведены расчетные данные по высоте (рис. 6) и скорости (рис. 7) от времени полета болида, для различных углов атаки. Остается открытым вопрос выбора начальной скорости в 18.6 км/с в качестве исходной, — по используемым в данной работе данным [1] непонятно, на какой момент времени они зафиксированы. Тем не менее, из рис. 7 видно, что на момент взрыва (время порядка 22 с, при высоте 23 км — рис. 6) скорость не изменилась значительно. Совпадение времен и высот взрыва (в данных расчетах, которые начитаются с высоты 60 км, время относительно реального сдвинуто на 10 с вперед, — по данным для Челябинского метеорита взрыв произошел на 32 с полета) с реальными показывают, что используемая модель достаточно адекватно описывает движение тела как единого целого в атмосфере до момента полного разрушения.

Весьма сложный процесс фрагментации и разрушения (мы его детально описали выше) очень сложно моделировать впрямую, поэтому мы ограничимся здесь лишь результатами гидродинамических расчетов движения тела. На рис. 8 приведен двумерный расчет для высоты 29.7 км, который показал максимальное давление в передней точке тела 5.4 МПа, что близко совпадает с параметрами расчетов по траекториям.

Двумерные расчеты дают более полную информацию по обтеканию метеорита потоком воздуха. Хорошо видна вторая волна сжатия идущая от оси, и образующаяся в результате схождения к оси потоков за метеоритом. Кроме того в обратном, догоняющем потоке воздухе (рис. 9) достигается скорость 21.5 км/с, что на 4.5 км/с выше скорости метеорита.

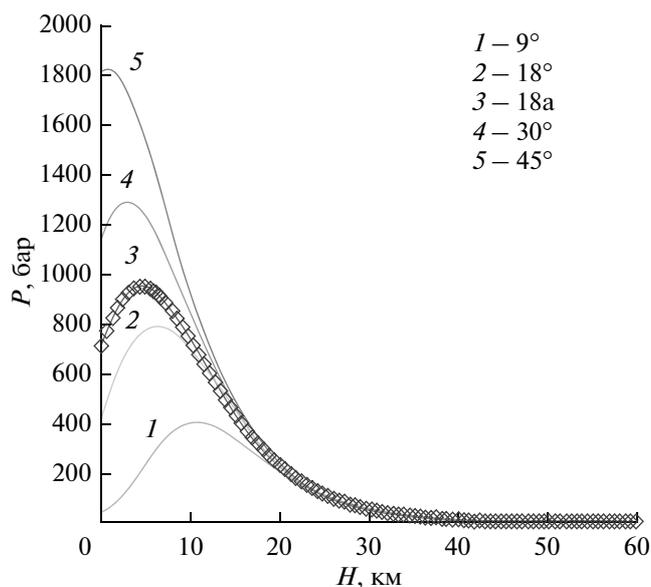


Рис. 2. Зависимость давления в критической точке от высоты для различных углов входа в атмосферу. Ромбиками показана аналитическая зависимость для угла входа 18° без учета потери массы за счет нагрева.

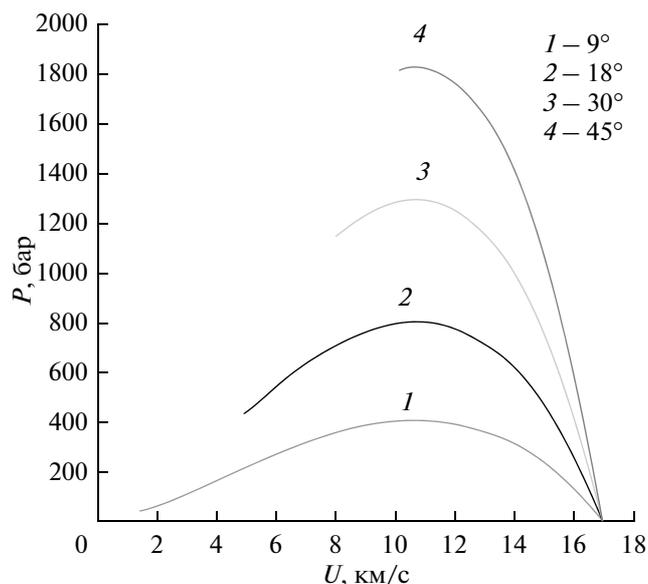


Рис. 3. Зависимость давления в критической точке от скорости для различных углов входа в атмосферу.

3. КОМЕТЫ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ

3.1. Столкновение кометы Шумейкерв—Леви с Юпитером

Прошло не более двух десятков лет после падения кометы Шумейкерв—Леви 9 (SL9) на Юпитер. Это редчайшее космическое событие, свидетелями которого мы стали, дало не только массу новой информации по строению атмосферы, ионосферы и магнитосферы Юпитера, но и позволило проверить наши знания о космических ка-

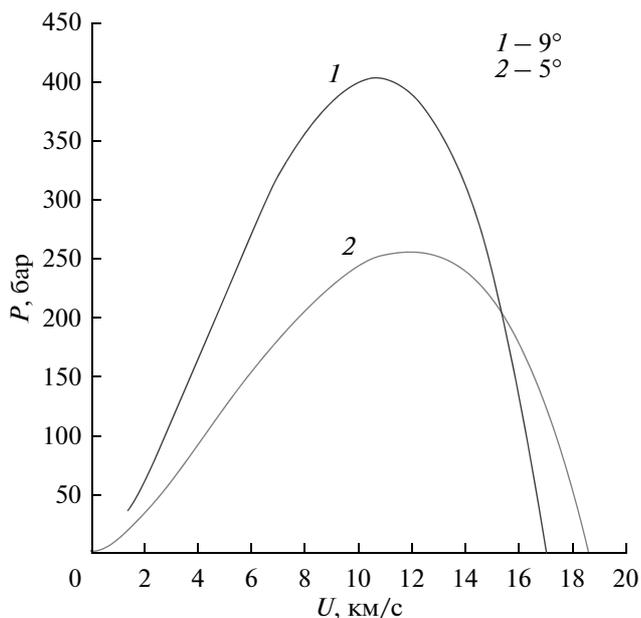


Рис. 4. Давление в критической точке от скорости метеорита при торможении в атмосфере для угла входа 9° со скоростью 17 км/с и угла входа 5.2° со скоростью 18.6 км/с

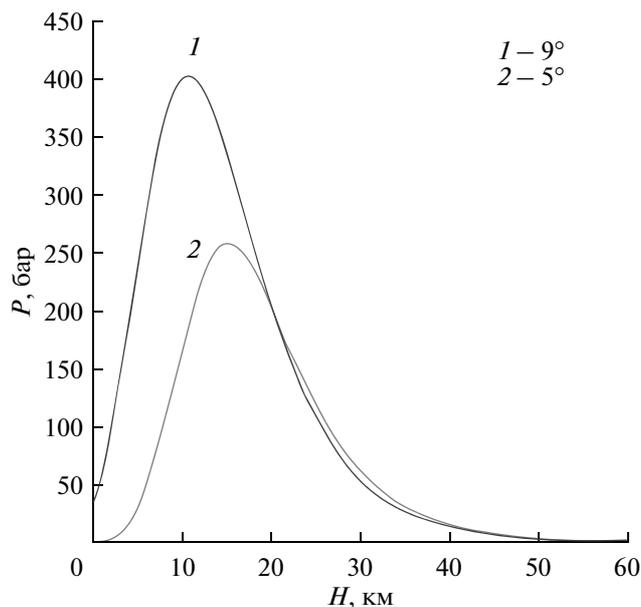


Рис. 5. Давление в критической точке от высоты для углов входа 9° со скоростью 17 км/с и угла входа 5.2° со скоростью 18.6 км/с.

гастрофах такого рода, сравнить результаты моделирования с “реальным экспериментом”, оценить теоретические модели. Особый интерес этому событию придает тот факт, что в этот раз удалось не только предсказать само падение, но и детально наблюдать сам процесс и его последствия, что является уникальным случаем для современной астрофизики, когда большинство событий приходится анализировать постфактум.

Столкновение же подобной кометы или астероида с Землей маловероятно — по оценкам [11] такое событие происходит один раз в миллион лет. И мы не можем даже предсказать, когда это произойдет: возможно, через миллион лет, но не исключено, что и в нашем столетии. Учитывая, что комета Шумейкер–Леви была открыта всего за 16 месяцев до ее удара по Юпитеру, обнаружение подобной кометы на орбите к Земле может стать для нас весьма неприятным сюрпризом и

Таблица 2. Параметры обтекания метеорита, вычисленные с учетом уноса массы и, в скобках, вычисленные по формулам (1)–(3) без учета уноса массы

Угол входа	Z_m , км	P_m , бар	U_m , км/с
9	12(9)	400(480)	10.7
18	6(4.5)	800(950)	10.7
30	3(1.3)	1300(1530)	10.73
45	1(–1)	1800(2170)	10.76

скорее всего приведет к катастрофическим последствиям: предсказываемая мощность взрыва кометы Шумейкеров–Леви при ее торможении в атмосфере Юпитера составляет $\approx 10^{22-24}$ Дж, или $\approx 10^{6-8}$ мегатонн тротилового эквивалента. Эта величина в десять тысяч раз больше накопленного на Земле ядерного потенциала и примерно равна 250 миллионам бомб, сброшенных на Хиросиму. По современным представлениям, согласно которым в результате столкновения астероида или крупной кометы с Землей (с диаметром порядка 10 км, освобождаемая в результате взрыва энергия $\approx 10^{24}$ Дж или $\approx 10^8$ мегатонн) 65 млн. лет назад произошло запыление атмосферы, изменение климата и вымирание мезозойских групп животных [12]. Отметим также, что мощность взрыва широко известного Тунгусского метеорита (диаметром ≈ 50 м) оценивается примерно в 30–50 мегатонн тротилового эквивалента, т.е. в миллион раз меньше мощности взрыва кометы Шумейкеров–Леви. По оценкам [11] падение на Землю метеоритов, подобных Тунгусскому, происходит один раз за 200–300 лет.

Поэтому необходимо понимать, как происходит процесс подобных столкновений и иметь возможность оценить его последствия для крупных планет Солнечной системы. С этой точки зрения столкновение кометы Шумейкеров–Леви с Юпитером дало информацию не только о самом Юпитере, но и о характере ударного взаимодействия крупных комет и метеоритов с атмосферами планет.

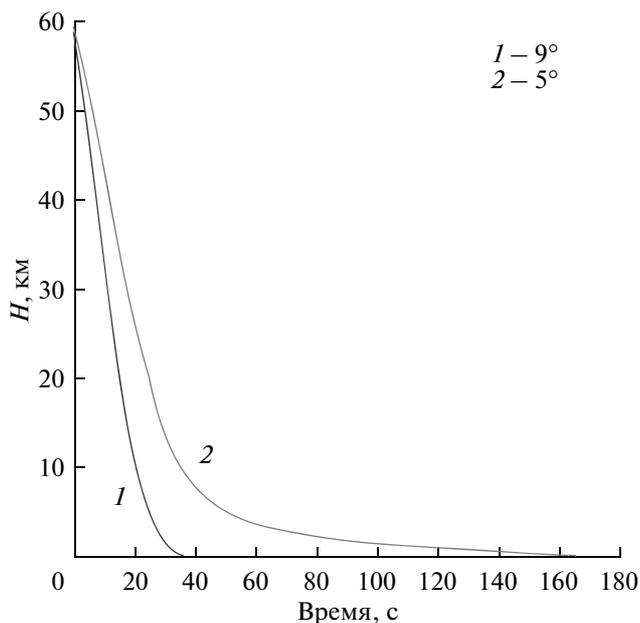


Рис. 6. Высота полета метеорита от времени при движении в атмосфере, начальная скорость 18.6 км/с.

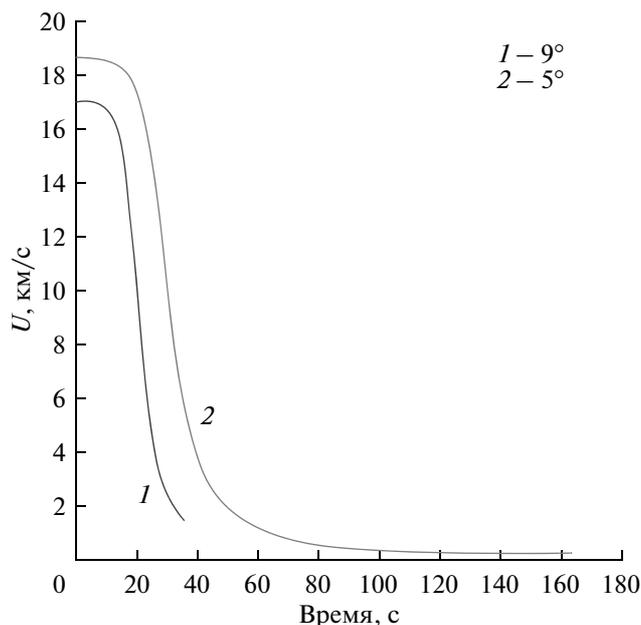


Рис. 7. Скорость полета метеорита от времени при движении в атмосфере, с начальной скоростью 18.6 км/с.

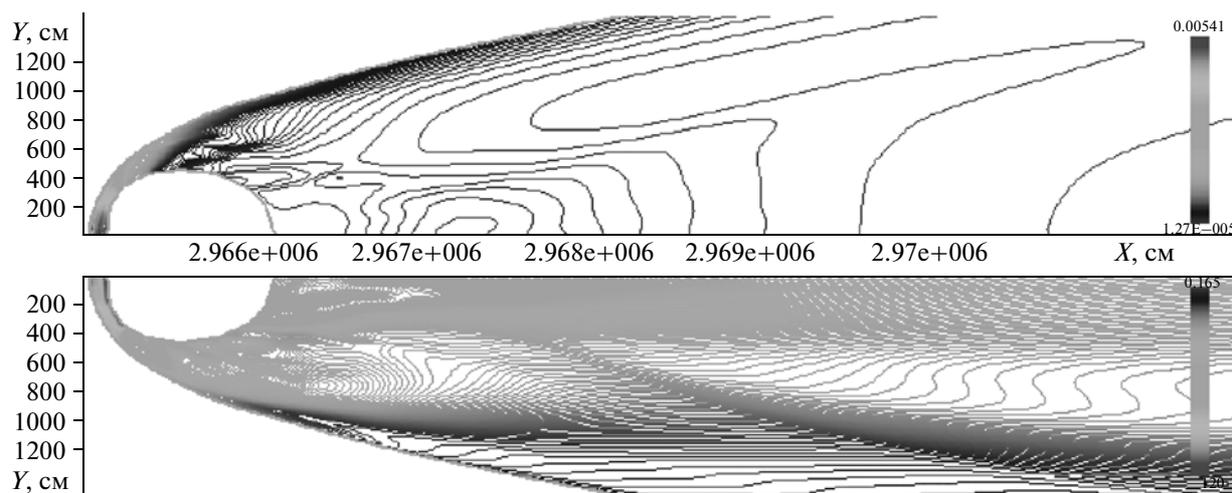


Рис. 8. Изолинии давления и внутренней энергии потока воздуха.

Таким образом, можно считать, что со времени падения Тунгусского метеорита ученые не получали столь ценного объекта для своих наблюдений, правда, затрудненных тем, что столкновение произошло с невидимой нам стороной Юпитера.

3.1.1. Историческая справка. Комета, всколыхнувшая весь научный мир, была открыта К.С. Шумейкер, Ю.М. Шумейкером и Д.Х. Леви на Паломарской обсерватории 24 марта 1993 г. и получила название “Комета Шумейкеров–Леви 9” [13]. Уже первые снимки кометы показали, что это – необычная комета. Ее изображение имело вид полосы, подобной следу метеорита в атмосфере Земли. Длина полосы равнялась примерно 1’.

Полоса была без центральной конденсации и на небе была ориентирована с востока на запад. Комета имела неяркий лучистый хвост. Через две ночи Дж.У. Скотти получил изображение этой кометы в виде узкой полосы длиной 47” и шириной 11” [14]. Им было зафиксировано, что в изображении кометы присутствуют, по крайней мере, 5 отдельных ярких фрагментов. Наиболее яркий фрагмент был обнаружен примерно на расстоянии 14” от восточного конца линейного изображения кометы. В первом сообщении [13] было дано 5 точных астрометрических положений кометы, относящихся к середине изображения этой кометы. Обработка первых астрометрических на-

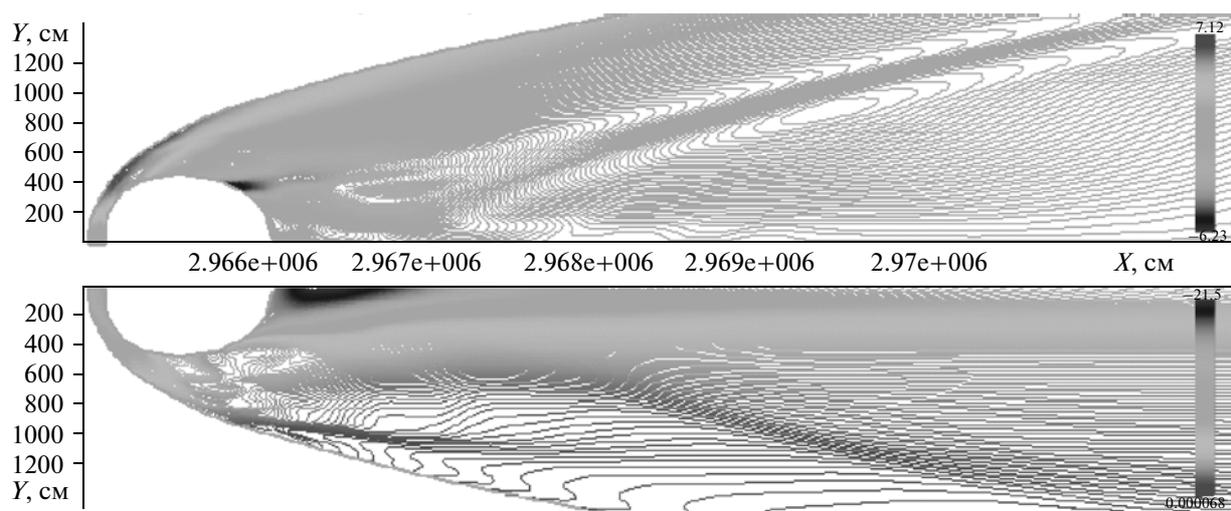


Рис. 9. Изолинии поперечной и продольной компонент массовой скорости потока воздуха.

блюдений кометы показала, что существует достаточно большая вероятность столкновения кометы с Юпитером в 1994 г. Дальнейшие улучшения орбиты кометы с привлечением новых наблюдений, а также орбит отдельных фрагментов, подтвердили вывод о возможности столкновения кометы с Юпитером.

На момент столкновения с Юпитером комета состояла из 25 космических тел — светящихся объектов, вытянувшихся в цепочку длиной несколько миллионов километров. На рисунке 10 представлена фотография кометы SL9, полученная на HST в мае 1994 г. [15]. Траекторные расчеты позволяют предположить, что объекты, составляющие изображенную на фотографии комету, являются осколками большого “родительского” космического тела (см., например, [16]). Согласно этим расчетам в начале июля 1992 г. родительское тело уже пролетало вблизи Юпитера на расстоянии примерно $1.6 R_J$ (R_J — радиус Юпитера) и было разрушено приливными силами, вызванными градиентом гравитационного поля Юпитера.

С такой гипотезой формирования кометы SL9 в виде последовательности космических тел согласны сейчас почти все исследователи, — родительское тело было захвачено Юпитером несколько десятилетий назад, однако определить происхождение родительского тела и его более раннюю траекторию, по-видимому, невозможно из-за хаотичности его орбиты.

Гораздо больше неясностей вызывают попытки ответить на вопрос: что же представляло собой родительское тело с точки зрения морфологии? Почти все имеющиеся модели рассматривали его в виде набора дискретных масс, а различие моделей заключалось в следующем: одни исследователи полагали, что отдельные массы связаны друг с другом существующей между ними относительно

слабой механической связью, а другие — что отдельные куски удерживаются рядом благодаря силам самогравитации. Подобное существенное различие в исходных моделях уходит своими корнями на несколько десятков лет назад, когда были выдвинуты две диаметрально противоположные по своей идеологии модели строения ядер комет: модель “ледяного конгломерата” (icy conglomerate) и модель “песчаного роя” (sand bank). Подробное описание этих моделей можно найти в превосходной монографии [17].

Остановимся на описании модели, которая выглядит предпочтительней [18]. Родительское тело представляло собой конгломерат конечного числа дискретных ядер, механически связанных друг с другом. Его распад происходил постепенно. Во время пролета родительского тела (размер которого в соответствии с моделью “ледяного конгломерата” был около десяти километров) вблизи Юпитера в июле 1992 г. приливные силы привели к его растрескиванию и распаду на несколько крупных фрагментов (наиболее вероятно — на два или три), которые продолжали распадаться уже после прохода кометой перигея. Вторичная фрагментация осколков продолжалась достаточно долго, по меньшей мере — вплоть до апреля 1993 г. Этот вывод можно сделать, сопоставляя данные наблюдений за взаимным положением фрагментов в комплексах Q1–Q2 с результатами траекторных расчетов (рис. 11 [15]). В результате вторичной фрагментации родительское тело распалось в конечном итоге на достаточно большое количество осколков размером от нескольких сот метров до 2–3 км. В дальнейшем, под действием градиента гравитационного поля эти осколки вытягивались в одну линию.

3.1.2. Взрыв кометы в атмосфере Юпитера: качественные особенности и результаты численного моделирования. Вхождение кометы в атмосферу



Рис. 10. Фотография кометы SL9, полученная на HST в мае 1994 г. Каждый фрагмент кометы обозначен буквой латинского алфавита.

Юпитера, плотность и давление которой возрастают с глубиной по экспоненциальному закону, как, впрочем, и атмосфера любых планет, сопровождается интенсивными механическими и радиационно-тепловым нагрузкам на твердые фрагменты кометы. Перед фрагментом, движущимся со скоростью, на два порядка превышающей скорость звука в атмосфере, образуется скачок уплотнения атмосферного газа — отошедшая ударная волна, располагающаяся впереди фрагмента на расстоянии порядка одной десятой характерного размера твердого тела. Область между ударной волной и лобовой поверхностью фрагмента, так называемый ударно-сжатый слой, заполнен атмосферным газом с примесями паров вещества кометы, сжатым до давлений в несколько тысяч атмосфер и разогретым до температур порядка 10000 К вследствие почти полного торможения набегающего газового потока в центральной части лобовой поверхности фрагмента кометы.

Движение газового потока относительно боковой поверхности твердого компактного фрагмента характеризуется большими градиентами скорости в направлении нормали к обтекаемой поверхности тела и, как следствие, значительной диссипацией кинетической энергии вязкого газа, приводящей к сильному разогреву приповерхностных слоев газа и твердого тела. Атмосферный газ в этом пограничном слое, так же как и в ударно-сжатом слое, начнет светиться, излучая в инфракрасном и оптическом диапазоне, а материал твердого фрагмента — испаряться. Количество уносимой при этом массы твердого тела будет относительно невелико, так как скорость фронта испарения, определяемая отношением энергии излучения в пограничном и ударно-сжатом слое к теплоте испарения кометного вещества для рассматриваемого случая не превышает долей м/с.

Основное влияние на движение фрагмента кометы оказывают механические нагрузки, действующие со стороны ударно-сжатого слоя. Их действие проявляется в виде явлений торможения,

разрушения и неупругого (пластического) деформирования фрагмента.

На движение фрагмента кометы и его термическое состояние существенное влияние будут оказывать процессы разрушения. Эти процессы будут проявляться главным образом в виде отколов вещества фрагмента, фазовых превращений (дробления, плавления и испарения кометного вещества), а также относительных перемещений частей фрагмента. Под действием растягивающих нормальных напряжений происходит откол крупных кусков фрагмента от тыльной и боковой поверхности обтекаемого тела.

Однако вследствие относительной плавности роста газодинамических нагрузок и длительности их действия отражение волн сжатия от свободной поверхности приведет, по-видимому, к заметным растягивающим напряжениям только в областях схлопывания, т.е. геометрического схождения волн разгрузки. Оценки показывают, что существенно большее разрушительное действие на фрагмент кометы будут оказывать непосредственно волны сжатия. Быстрое, практически адиабатическое, деформирование передней части фрагмента приведет к тому, что по твердому телу вслед за упругим предвестником начнет распространяться волна фазовых (структурных) превращений. При относительно низких газодинамических нагрузках, соответствующих началу движения фрагмента в атмосфере Юпитера, эта волна структурных превращений будет представлять собой волну дробления. С ростом газодинамических нагрузок при движении вглубь атмосферы к дроблению кометного вещества добавляется его плавление и испарение. На этой стадии движение и характер обтекания фрагмента, даже раздробленного, слабо отличается от движения компактного фрагмента. Полагая, что разрушение фрагмента начинается при плотности окружающего газа ρ_* порядка σ_*/v^2 где σ_* — прочность вещества фрагмента на сжатие, получим $\rho_* = 2 \times 10^{-6}$ г/см³,

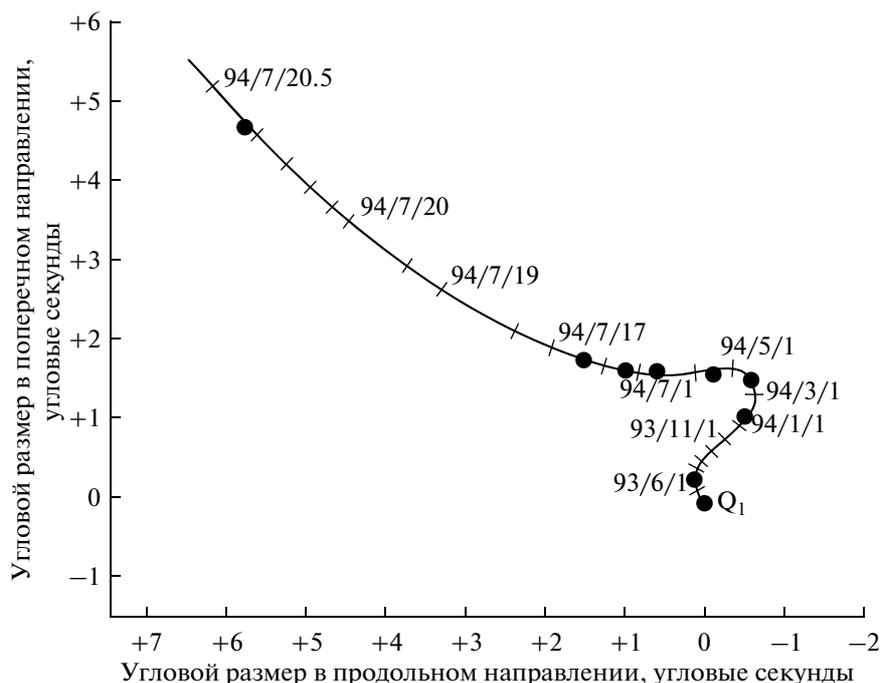


Рис. 11. Взаимное пространственное расположение фрагментов Q1-Q2 в разные моменты времени. Представлены наблюдательные данные, полученные на HST (•) и результаты оптимизированного решения, основанного на модели “ледяного конгломерата”.

что соответствует высотам ≈ 100 км юпитерианской атмосферы.

Помимо непосредственного разрушения (плавления, испарения) передней части фрагмента происходит его деформация как целого. Эта деформация обусловлена неравномерностью давления в ударносжатом слое. Поскольку давление максимально в центре лобовой поверхности и быстро убывает к его краям, такое распределение нагрузки приведет к сносу раздробленного вещества, к выдавливанию жидкой (или газообразной) фазы на периферию лобовой части и к последующему ее уносу набегающим потоком, а также к пластическому растеканию фрагмента в направлении перпендикулярном к направлению движения, и, в конечном счете, к разделению его на ряд отдельных осколков. Отметим, что процесс дробления будет повторяться для каждого достаточно крупного осколка до тех пор, пока аэродинамические нагрузки будут приводить к напряжениям, превышающим прочностные характеристики материала кометы. На этой стадии раздробленный фрагмент кометы уже не обтекается набегающим потоком воздуха как единое целое: каждый достаточно крупный осколок обтекается отдельно. При этом характер движения существенно отличается от случая компактного фрагмента: раздробленный фрагмент сильнее тормозится. Рассыпание фрагмента вызывает, в свою очередь, резкое возрастание теплового потока (обратно пропорционально его радиусу кривизны обтекаемого фрагмента) в си-

лу резкого увеличения эффективной поверхности фрагмента и перехода вещества из конденсированного состояния в газообразное. При этом образуется газовое облако, имеющее температуру, давление и плотность, значительно превышающие соответствующие значения в окружающей невозмущенной атмосфере. Такое облако начинает интенсивно расширяться, продолжая с огромной скоростью двигаться вниз. Подобный быстропротекающий процесс образования газодинамического облака и его дальнейшее расширение в начальный период времени можно рассматривать как взрыв.

Заметим, что рассмотренный выше механизм на качественном уровне объясняет, почему небольшие метеориты сгорают, а крупные взрываются.

Картина газодинамических течений, возникающая после взрыва кометы, характеризуется следующими основными особенностями.

Через короткий промежуток времени после взрыва (десятые доли секунды) основная часть вещества фрагмента собирается в чашеобразном слое радиуса ≈ 3 км и толщиной около 1 км с обращенными вверх краями чаши. Форму, которую принимает вещество кометы, можно объяснить тем, что передний фронт облака испытывает сильное торможение при вхождении в плотные слои атмосферы, а основная часть вещества кометы продолжает инерционное движение с большей скоростью, чем передний фронт. На рис. 12а приводятся изолинии температуры, на рис. 12б [19] — поле скоростей для момента времени 0.6 с после

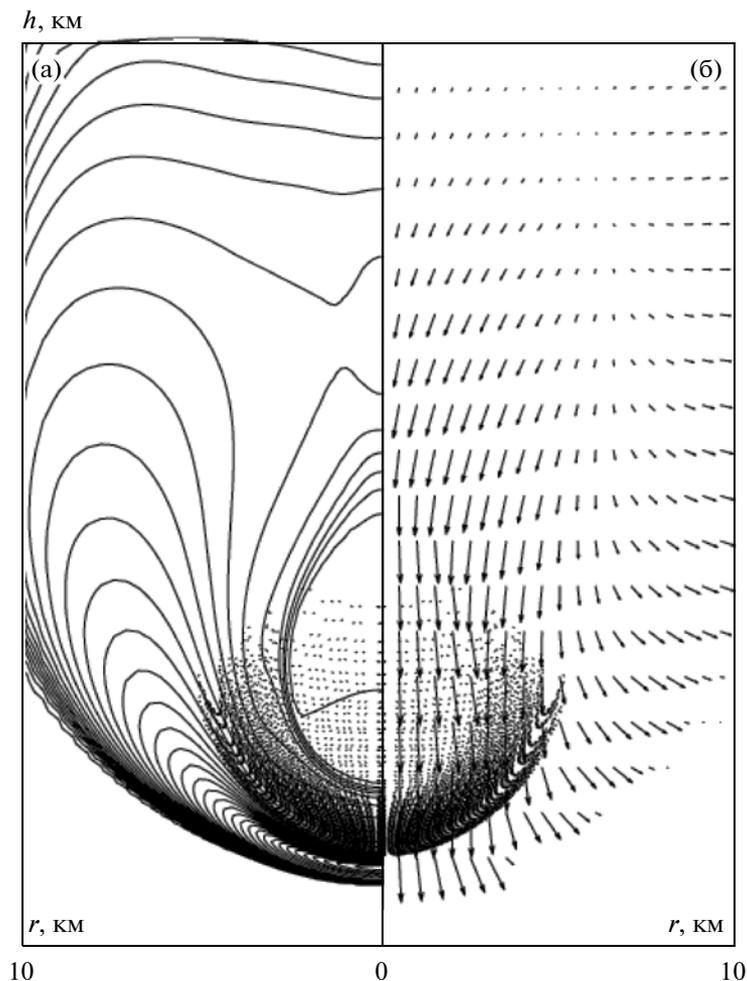


Рис. 12. а) Изолинии температуры; б) поле скоростей через 0.6 с после взрыва кометы на высоте $h = -150$ км (атмосферное давление $p \approx 31$ бар). Точки на рисунке – маркеры, относящиеся к частицам фрагмента кометы. Максимальная скорость потока $v_{\max} = 42$ км/с [19].

взрыва. Максимум температуры находится в ударном слое между головной ударной волной и метеоритным облаком и соответствует примерно 22000 К. Максимальная скорость в газодинамическом потоке $v_{\max} = 42$ км/с. При этом часть газа на периферии облака уже начинает подниматься вверх, но основная часть продолжает движение вниз. В хвосте метеоритного облака на изолиниях температуры виден ее локальный максимум, который со временем увеличивается. Непосредственно за облаком образуется область разрежения, куда устремляется атмосферный газ. В окрестности оси в хвостовой части облака газ, втекающий в область разрежения, испытывает торможение, что вызывает в дальнейшем образование локального скачка уплотнения.

За время $t \approx 1$ с облако газа (рис. 13 [19]), образованного из вещества кометы, существенно увеличивается до размера $R = 7$ км, интенсивно взаи-

модействуя с набегающим (относительно облака) потоком атмосферного газа. Для этого момента времени характерно образование висячего скачка уплотнения в хвостовой части облака, а также существенное торможение лобовой части за счет увеличения эффективного сечения. При этом максимум скорости перемещается в хвост метеоритного облака. Максимальная величина скорости в потоке равна $v_{\max} = 38$ км/с. Для течения в данный момент времени характерно формирование сильного вихря с центром около 5 км от оси симметрии. В область вихревого течения в дальнейшем будет захватываться значительная часть вещества фрагмента кометы и окружающего воздуха.

На рис. 14 [19] изображены изолинии температуры (рис. 15а [19]) и поле скоростей (рис. 15б [19]) для момента времени $t \approx 4$ с. К этому моменту времени наблюдается значительное торможение облака, так что максимальная скорость пото-

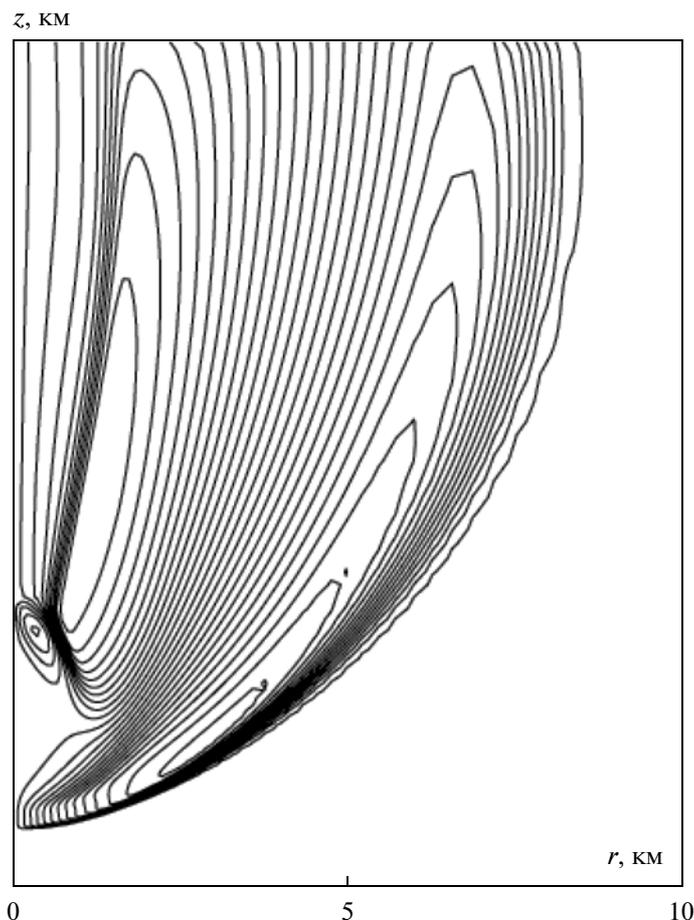


Рис. 13. Изолинии радиальной составляющей скорости потока, соответствующей моменту времени $t = 1$ с после взрыва [19].

ка составляет 19 км/с. Наиболее интенсивное движение газа наблюдается в хвостовой части облака. Частицы вещества метеорита занимают при этом по периметру характерную грушевидную область. Радиус облака составляет 7–8 км. Часть вещества кометы остается в застойной области в лобовой части, в то время как большая часть захвачена вихрем. При этом за облаком тянется шлейф из метеоритного вещества на расстоянии около 4–6 км от оси.

На временах $t \approx 6$ с после взрыва (рис. 15 [19]) передний фронт облака практически затормозился и движется со скоростью около 1 км/с, но газ в хвостовой части продолжает интенсивное движение вниз с максимальной скоростью потока до 8 км/с. Радиус облака равен 10 км. На рис. 15 хорошо видно образование вихревого кольца. Основная масса оказывается втянутой в ядро вихря, образующего тор. Ядро вихря движется вниз со скоростью 4 км/с. При этом на периферии облака газ поднимается вверх со скоростью 1 км/с. Облако кометы достигает минимальной высоты $h_{\min} = -240$ км, что соответствует давлению $p_{\max} = 100$ бар. Головная

ударная волна к этому моменту времени в значительной степени потеряла свою интенсивность, размылась и отошла от облака на расстояние около 3–4 км. В дальнейшем ударная волна продолжает движение вниз и быстро затухает. Глобальный максимум температуры перемещается из области ударной волны в центр облака. Температура облака достигает температуры в четыре тысячи градусов (при этом облако в значительной степени состоит из атмосферного газа). Для данного момента времени характерно образование термика (облака нагретого газа в конвективно слабо-возмущенной атмосфере).

Следующая стадия движения кометного облака характеризуется его всплытием под действием архимедовой силы. При этом формируется сложная картина газодинамического течения, сопровождающаяся образованием отчетливо выраженного струйного течения. На поздней стадии всплытия газового облака становится существенным турбулентное перемешивание.

Таким образом, торможение и взрыв фрагмента кометы в атмосфере Юпитера приводит к обра-

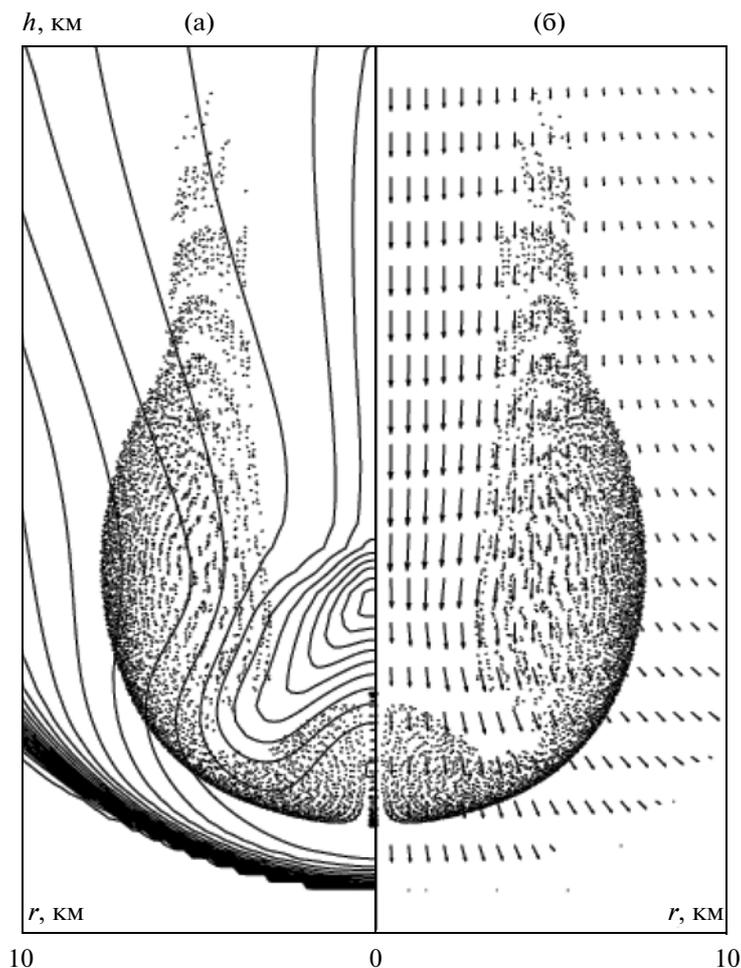


Рис. 14. а) Изолинии температуры; б) поле скоростей через 4 с после взрыва кометы. Точки на рисунке – маркеры, относящиеся к частицам фрагмента кометы. Максимальная скорость потока $v_{\max} = 15$ км/с [19].

зованию облака и его быстрому подъему за счет архимедовой силы до высот мезосферы $h = 250$ км ($p_h \approx 1, 6 \times 10^{-5}$ бар), где оно и останавливается. Примерно через час после взрыва, когда в результате вращения Юпитера место взаимодействия фрагмента с атмосферой будет доступно наземным наблюдателям, облако взрыва приобретает форму диска с характерным диаметром D_f порядка тысячи километров и толщиной h_f порядка сотни километров.

Легко можно оценить плотность кометного вещества ρ_c в облаке: $\rho_c \sim \rho_i D^3 / D_f^2 h_f \approx 10^{-9}$ г/см³. Отметим, что на стадии, когда облако неподвижно, оно состоит примерно из девяти частей юпитерианского воздуха и одной части кометного вещества, т.е. облако содержит информацию о взрыве. Это своеобразная “память” о происшедшем столкновении, и, как показывают наши расчеты, атмосфера Юпитера будет помнить комету Шумейкеров–Леви, а точнее, каждый ее достаточно крупный фраг-

мент, по крайней мере, в течение нескольких часов после взрыва.

3.1.3. Наблюдения в период столкновения с Юпитером. Времена падения осколков кометы SL9 на Юпитер и расположение мест их ударов на поверхности планеты были рассчитаны многими авторами (см., например, [20, 21]). В соответствии с этими расчетами фрагмент А должен был упасть 16 июля, а два последних фрагмента – V и W – 22 июля. На основании этих данных во второй декаде июля в процесс наблюдения включилось большое количество телескопов, расположенных в различных точках Земли. Наилучшие возможности для наблюдения Юпитера (его видимость из данной точки, а также чисто погодные условия) были у обсерваторий, находящихся в южном полушарии. Особенно благоприятные погодные условия были в обсерваториях Южной Африки (SAAO) и Австралии (AAT). Довольно длительные серии наблюдений были проведены в обсерватории-

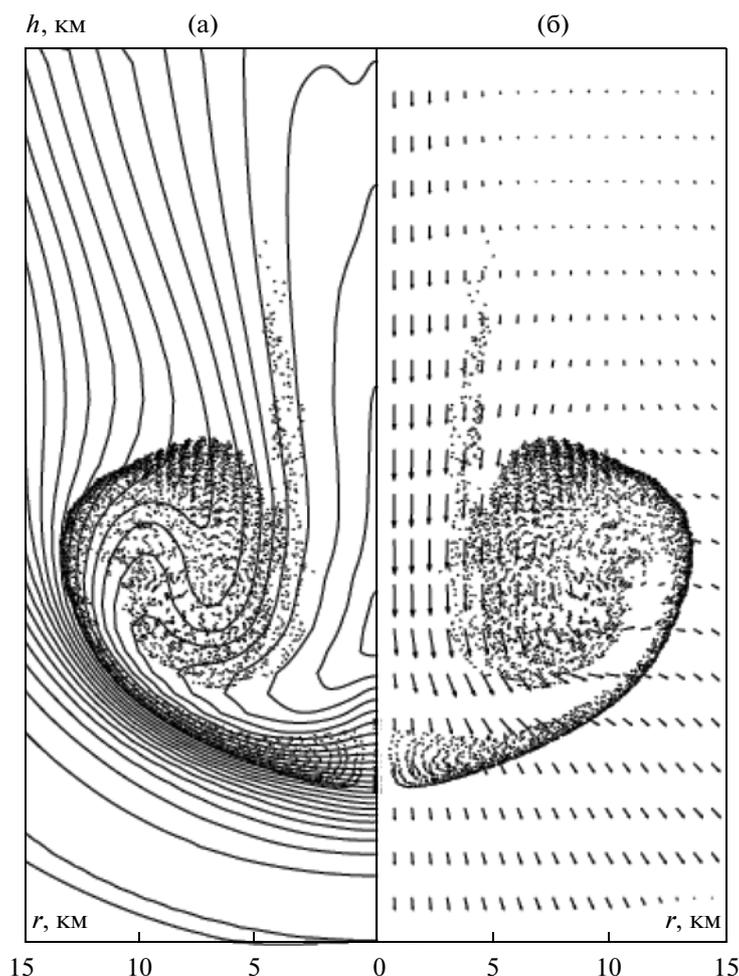


Рис. 15. а) Изолинии температуры; б) поле скоростей через 6 с после взрыва кометы. Момент полного торможения фронта облака и максимального погружения в атмосферу Юпитера. Положение фронта облака соответствует высоте $h = -240$ км и давлению $p = 100$ бар [19].

ях La Palma (Канарские Острова), Calar Alto (Испания), обсерваториях Японии и Гавайских островов.

Несмотря на плохую погоду, значительный вклад в наблюдения этого уникального события внесла Европейская южная обсерватория (ESO), наблюдательная база которой располагается в Чили. В ней было задействовано 10 телескопов, среди которых выделялись большие телескопы с диаметром зеркала 3.5 м и 3.6 м (так называемый телескоп перспективной технологии – NTT – использующий новые принципы адаптивной оптики). Наиболее эффективно работал высокочувствительный инфракрасный детектор TIMMI – инструмент, позволяющий получать изображения в далекой ИК области. Этот инструмент успешно действовал даже в дневное время. В результате на телескопе NTT (ESO) с помощью TIMMI было получено более 120000 изображений мест падения осколков кометы и картины их эволюции, а также кривые блеска Юпитера во время падения осколков SL9.

Исключительно важный фактический материал был получен с помощью космического телескопа Хаббла. Наблюдения, выполненные на этом телескопе, дали исключительно подробные изображения атмосферных явлений, вызванных падением осколков кометы, и позволили выполнить детальные спектральные измерения во время этих событий. Неоценимый вклад в понимание процессов, вызванных падением фрагментов кометы, был внесен также благодаря данным, полученным на космическом аппарате Галилео: места падения осколков на поверхности Юпитера находились относительно Галилео в прямой зоне видимости, в то время как для земных наблюдателей они были скрыты за лимбом. Наблюдения велись с помощью следующих четырех инструментов, установленных на Галилео: спектрометра ближнего ИК излучения – Near-Infrared Mapping Spectrometer (NIMS), фотополариметра – Photopolarimeter-Radiometer (PPR), твердотельного детектора – Solid State Imager (SSI) и ультрафиолетового

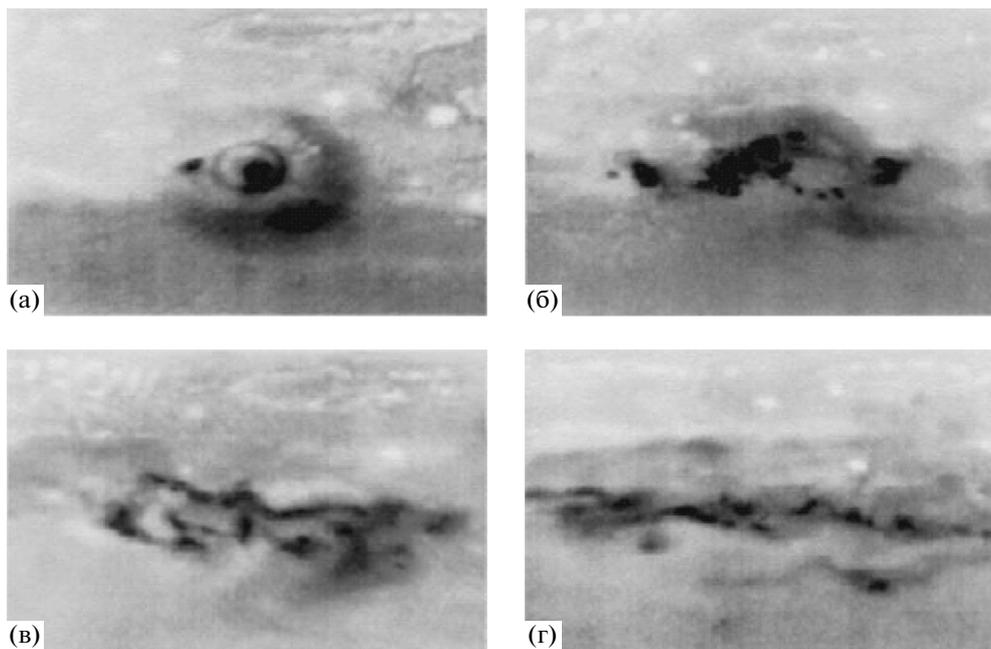


Рис. 16. Фотографии получены на HST в оптическом диапазоне. Эволюция места падения осколка G: (а) 18 июля 1994 г. (примерно через час после удара); (б) 23 июля 1994 г.; (в) 30 июля 1994 г.; (г) 24 августа 1994 г.

спектрометра — Ultraviolet Spectrometer (UVS). Наблюдения, выполненные с помощью этих инструментов в широком, от ИК до УФ диапазоне, позволили получить богатейшую информацию о процессах, происходивших в атмосфере Юпитера при входе осколков кометы SL9.

Более детально основные результаты наблюдений и их интерпретацию см. в обзоре [18].

3.1.4. Юпитер после столкновения: Долговременные эффекты в атмосфере. Через 10–20 мин после падения каждого из осколков места их ударов появлялись на краю лимба. По мере дальнейшего вращения Юпитера на видимой стороне планеты в тех местах, куда упали осколки, появлялись огромные пятна. Наиболее подробная информация об этих пятнах была получена с помощью космического телескопа Хаббла [22]. Менее детальные, но зато более длительные наблюдения были проведены рядом наземных обсерваторий. На Земле были также выполнены подробные спектральные исследования мест удара. Полученные результаты дают следующую картину развития в атмосфере следов от падения кометы. Из пятнадцати зарегистрированных следов только пять, вызванных ударом наиболее крупными осколками, привели к значительным возмущениям в атмосфере Юпитера, сохранявшимся длительное время (несколько месяцев). На рис. 16 представлена серия фотографий, полученных на HST в видимом диапазоне [22]. Данная серия демонстрирует эволюцию следа, оставленного в атмосфере после падения осколка G — одного из наиболее крупных фрагментов кометы (небольшое пятно слева от

основного возмущения соответствует месту падения небольшого фрагмента D). Все снимки фактически относятся к начальной стадии развития возмущений в атмосфере и имеют ярко выраженные общие черты и спектральные особенности, устойчиво проявляющиеся при использовании различных фильтров видимого, ИК и УФ диапазонов. Основной особенностью пятен (не только для осколка G, но и во всех других случаях) является то, что они были более яркими по сравнению с невозмущенной поверхностью Юпитера в полосах поглощения метана и темными на всех других длинах волн.

Рассмотрим, как менялись со временем форма и размер мест падения осколков. Полученные в [22] пространственные масштабы характерных образований в зоне падения крупных осколков практически совпадают для всех зарегистрированных событий. Так, независимо от конкретного соударения, через полтора часа после падения осколка радиус темного кольца достигает примерно 3000 км, а скорость его расширения составляет 450 м/с и постоянна за все время процесса. Экстраполяция на момент падения фрагмента дает радиус начального возмущения в атмосфере близкий к 500 км. Внешний край серповидного образования отстоит от центра внутреннего пятна на расстояние 12000 км.

Выявленная на представленных снимках (рис. 16) структура возмущений наблюдалась на протяжении нескольких часов после падения соответствующих крупных осколков. С течением времени тонкая структура становится неразли-

чимой, а в районах падения остаются темные пятна (для изображений в видимом диапазоне спектра), постепенно вытягивающиеся вдоль соответствующей широты. По наблюдениям первых трех–четырёх суток после падения в юго-западной части образовавшегося пятна выделялось темное плотное ядро, а восточная часть пятна приобретала вид более разреженного шлейфа. На протяжении следующего месяца возмущения, все более вытягиваясь вдоль широты, оставались контрастными, однако в дальнейшем контрастность значительно ослабевала, а возмущения от отдельных столкновений постепенно сливались [22]. Тем не менее остаточные возмущения на широте падения кометы отличались от фоновой турбулентности в атмосфере Юпитера в течение еще нескольких месяцев.

Интерпретация описанной выше картины возмущений, данная в работе [22], кратко сводится к следующему. Видимые на снимках кольцевые структуры и центральное ядро образованы вынесенным в стратосферу материалом взорвавшегося в более глубоких слоях фрагмента кометы. Одновременно с веществом кометы в стратосферу должна была быть выброшена достаточно большая масса газа юпитерианской атмосферы. По оценке [23] сформировавшиеся после взрывов осколков облака состоят из девяти частей атмосферы и одной части кометного вещества. Центральное однородное пятно соответствует стволу выброса продуктов взрыва фрагмента, а серповидное образование и наблюдаемая лучевая структура возмущений, расходящихся от внутреннего края кольцеобразной области, вызваны осевшими после выброса в ионосферу (на высоту до 3200 км от точки взрыва) продуктами взрыва. Наблюдаемая асимметрия кольцевых структур и наличие серповидной зоны возникает из-за отклонения выброса от вертикали к поверхности, что, в свою очередь, обусловлено наклонным входом фрагментов кометы в атмосферу. Авторы [22] допускают, что ядро выброса и оседающий из стратосферы по периферии возмущенной зоны более разреженный материал кометы локализуется на существенно разных высотах, при этом разреженный шлейф располагается на более высоком уровне. Следуя изложенной гипотезе, дальнейшую эволюцию возмущений можно связывать с ветровой адвекцией материала кометы в атмосфере Юпитера. В частности, наблюдаемые различия в динамике расплывания ядра выброса и периферийных возмущений могут быть объяснены различием в структуре и интенсивности ветровых потоков на различных высотах. В то же время развитие возмущений в течение первых 2.5 часов после взрыва соответствующих фрагментов кометы носит, согласно приведенному в [22, 24] анализу, чисто волновой характер, как и предполагалось заранее. Действительно, зафиксированная скорость распространения этих возмущений одинакова для

всех случаев падения крупных осколков и, следовательно, крайне слабо зависит от величины энергозложения, что характерно для скорости распространения линейных волн, зависящей только от свойств среды (нелинейные эффекты незначительно изменяют эту закономерность). Волновой характер динамических структур подтверждается также постоянством скоростей выделенных фронтов во времени. Если бы возмущения были вызваны переносом частиц, эти скорости должны были бы заметно убывать в соответствии с падением амплитуды в расходящихся от эпицентра ударных волн, либо волн адвекции. Опираясь на эти приведенные рассуждения, авторы работы [24] делают заключение, что видимые на снимках HST кольцевые структуры являются волновыми фронтами, распространяющимися вдоль направления выброса в атмосферу материала кометы.

Можно также сделать предположение, что воздействие на атмосферу оказывает возникшая в результате взрыва осколка УВ. Расчеты показали, однако, что энергии УВ при выбранном сценарии торможения осколка явно недостаточно для значительного возмущения среды на площади, сравнимой с площадью центрального темного пятна, четко выделяющегося на снимках района падения фрагментов кометы. Кроме того, скорость распространения возмущений, создаваемых ударной волной, превосходит скорость звука в тропопause, которая примерно вдвое больше наблюдаемой скорости расширения этого пятна [25]. Таким образом, как гравитационно-волновой, так и ударно-волновой механизмы формирования наблюдаемых возмущений облачного покрова не объясняют достаточно убедительно специфическую структуру следа, а, главное, показывают, что энергетические затраты на генерацию возмущений такого масштаба чрезвычайно велики. В результате этого для объяснения наблюдаемой картины необходимо дополнительно выдвинуть жесткие требования к структуре и химическому составу атмосферы и высоте максимального энергозложения.

Указанные трудности можно обойти, приняв гипотезу о “тайфунной” природе наблюдаемых следов. Предположим, что воздействие на атмосферу ударной волны и поднимающегося горячего облака взрыва играют роль “спускового механизма” в развитии вихревых процессов в атмосфере Юпитера, аналогичных зарождению земных тайфунов. Эта гипотеза представляется вполне разумной, поскольку энергия сосредоточенная в вихревом движении, значительно меньше энергии осколка. При этом, следуя развитой в работе [26] теории, предположим, что основным источником энергии, порождающим мощный атмосферный вихрь, является вертикальная тепловая конвекция, значительная интенсивность которой характерна для Юпитера [27]. Распределение температуры по высоте атмосферы указывает на то, что наиболее интенсивный конвективный

перенос приходится на область тропосферы, лежащей ниже уровня тропопаузы ($p \approx 0, 1$ бар) и простирающейся от глубинных слоев до верхней кромки облаков. Характерный вертикальный масштаб конвективных ячеек при этом имеет порядок $h \approx 100-150$ км.

Анализируя ведущие физические факторы, определяющие формирование и эволюцию следа, выделим три стадии его развития. На начальной стадии формирования крупномасштабных структур в области падения большого осколка кометы основным возмущающим фактором является интенсивный вихрь в атмосфере, возникающий в результате захвата и закручивания окружающей атмосферы движущимися вверх УВ и ОШ. Дальнейшая эволюция этого сравнительно небольшого по масштабам вихря связана с его усилением за счет приобретения дополнительной энергии от конвективных потоков в атмосфере. Заключительная стадия формирования следа в атмосфере определяется воздействием изменяющейся по меридиану силы Кориолиса (β -эффект) на атмосферный вихрь, достигший к этому времени размеров, сравнимых с радиусом Россби, а также воздействием на этот вихрь горизонтальных ветровых течений, размывающих образовавшееся в атмосфере возмущение.

Тайфунная природа следов от падения осколков косвенно подтверждается и сравнением их фотографий с космическим снимком верхней кромки облаков в зоне земных тайфунов (тропических бурь), представленным на рис. 17 [28]. В земных условиях “глаз” тайфуна резко выделяется как зона выноса облачных слоев, лежащих в глыбе, над верхним горизонтом окружающего облачного покрова. В окрестности “глаза” четко видны следы вихревой динамики, расходящиеся по спиральным траекториям от оси тайфуна. Часто эти следы выглядят как круговые возмущения, центр которых сдвинут относительно “глаза”, а возмущения облачного покрова между выделяющимися более темными кольцами носят нерегулярный характер. Как мы видим, аналогичную структуру имеют и следы от падения кометы. Играющий здесь роль “глаза” центральный ринг имеет наибольшую светимость в области спектра, соответствующей светимости метана. Это позволяет интерпретировать его как зону, характеризующуюся выносом глубинных слоев атмосферы на поверхность облачного покрова, о чем уже говорилось ранее. Такая интерпретация подтверждается также и красно-коричневой окраской этой области, наблюдаемой на снимках следов, сделанных в естественных цветах [22]. Как известно, верхние слои облаков Юпитера состоят из аммиака и выглядят светлыми, содержащими ярко-белые кристаллы этого соединения. Расположенные глубже слои облаков содержат в своем составе гидросульфит аммония, кристаллы которого имеют красно-коричневый цвет. Вынос этих сло-

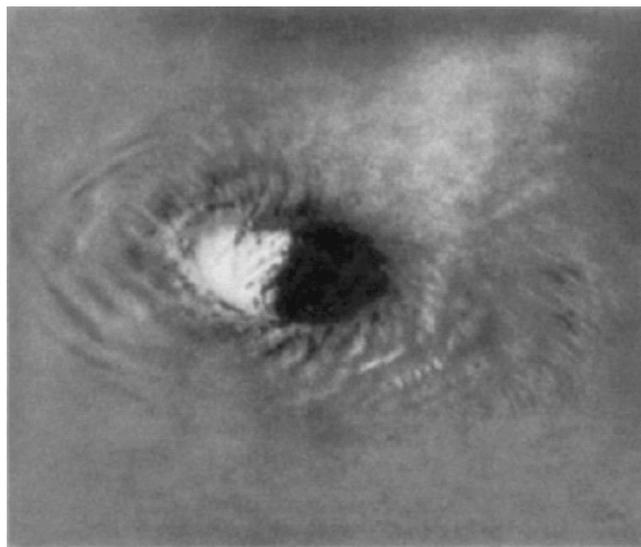


Рис. 17. “Глаз” бури – тропический тайфун на Земле.

ев на большие высоты будет создавать аэрозольный слой, имеющий красно-коричневую окраску на фоне аммиачных облаков.

Наблюдаемый радиус всей области, охваченной возмущениями в первые часы формирования следа, составляет $r_2 \approx 12000$ км, что совпадает с характерным радиусом зоны среднеширотной конвекции, выбранным нами из независимого анализа типов тепловой конвекции в атмосфере Юпитера. Таким образом, можно считать, что вихревое возмущение, создаваемое падением и взрывом большого фрагмента кометы, быстро захватывает всю область однотипных конвективных течений. Характерный вертикальный масштаб тайфунного вихря на момент его установления согласно [26] определяется из соотношения $H \approx h/\pi$, что в нашем случае соответствует 30–50 км.

Из полученных оценок следует, что толщина слоя атмосферы, захваченного вихревым движением, уже на начальной стадии процесса, определяемой несколькими часами, становится сравнимой с толщиной облачного покрова, а горизонтальная протяженность его более чем на два порядка превосходит вертикальный масштаб возмущений. Это должно приводить к интенсивному вертикальному перемешиванию, выравниванию скоростей и температуры на горизонтах и разрушению квазистационарных турбулентных конвективных ячеек, в результате чего регулярная энергетическая подпитка образовавшегося крупномасштабного вихря, по-видимому, должна нарушаться уже к концу первых суток после его возникновения в отличие от ситуации с тайфунами на Земле, получающими длительное время энергии от подстилающей поверхности океана.

Заметим, что порог возбуждения крупномасштабного вихря определяется соотношением [26]

$\alpha H/\nu > \pi$. Так как согласно полученной ранее оценке ≈ 30 км, из приведенного неравенства следует, что коэффициент спиральности должен быть $\alpha > 1000$ м/с. Учитывая связь α с характерным горизонтальным размером турбулентных ячеек l , получаем условие на характерные размеры этих ячеек, при которых обеспечивается рост крупномасштабных возмущений: $l \geq 400$ км. Полученная оценка вполне реалистична для атмосферы Юпитера и подтверждается полученной независимым путем оценкой для турбулентной вязкости. Действительно, так как $\nu = \nu_1/3$, а скорость зональных потоков на широте падения кометы $\nu \approx 10\text{--}20$ м/с, имеем $l \approx 1000$ км.

Выравнивание со временем вихревых течений по вертикали и заметное превышение горизонтальных масштабов образовавшегося вихря над вертикальными позволяет далее с высокой точностью исследовать развитие процесса в приближении “мелкой воды”, рассматривая эволюцию следа на заключительном этапе только в горизонтальной β -плоскости. Крупномасштабный вихрь к этому времени достигает размеров, сравнимых с радиусом Россби—Обухова [29] $R_R = c_s/2Q\sin\psi$, где c_s — скорость звука на горизонте локализации вихря (для $\psi = 45^\circ$ значение $R_R \approx 6000$ м). В этой ситуации на дальнейшую эволюцию вихря решающее влияние начинает оказывать изменение силы Кориолиса вдоль меридиана (β -эффект). В результате в атмосфере возникает достаточно устойчивый вихрь Россби [30], постепенно размываемый зональными течениями.

Результаты серии расчетов показали, что процесс формирования вихря Россби имеет пороговый характер. Считая, что вихрь Россби формируется из центральной части (ограниченной темным кольцом) первичного крупномасштабного вихря и беря это возмущение за начальное, получаем, что при энергосодержании в начальном вихре, меньшем 10^{29} эрг, в дальнейшем вихрь Россби не образуется, и возмущение в атмосфере за несколько суток расплывается под влиянием широтных течений. Это также дает возможность оценить снизу энергию наиболее крупных осколков SL9, падение которых привело к формированию в атмосфере Юпитера долгоживущих вихревых образований. Энергии $E_0 \approx 10^{29}$ эрг соответствует размер осколка примерно 2 км. Это хорошо согласуется с оценками, основанными на анализе кривых блеска, полученных на Галилео, и на содержании молекул в верхней атмосфере, синтезированных ударом. При большем энергосодержании в начальном вихре (примерно на вторые сутки) из него формируется антициклонический вихрь Россби с конечными параметрами, слабо зависящими от изменения исходных данных в довольно широком интервале: $0.5 R_R \leq R_0 \leq R_R$, 10^{29} эрг $\leq E_0 \leq 10^{30}$ эрг. Как показали расчеты, профиль ветрового поля в местах падения оскол-

ков оказывает заметное влияние на форму образующегося вихря Россби, чем, по-видимому, объясняется разнообразие в форме следов, наблюдаемое через несколько суток после падения кометы. На рис. 18 приведены расчетные поля потенциальной температуры в вихре, соответствующие 6-м, 10-м и 30-м суткам после падения фрагмента кометы. Начальные параметры задачи были выбраны приближенно соответствующими параметрам атмосферы в районе падения осколка G. Энергосодержание начального тайфунного возмущения E_0 было принято равным 10^{29} эрг, начальный радиус возмущения $R_0 = R_R \approx 6000$ км. Из приведенных рисунков видно, что характерный размер ядра вихря по меридиану на шестые сутки примерно равен радиусу Россби. Это совпадает с размерами ядра следа от осколка G на снимке поверхности планеты в соответствующий момент времени [22]. В дальнейшем вихрь Россби под действием зональных течений и силы Кориолиса значительно вытягивается в широтном направлении, оставаясь практически неизменным в меридиональном направлении, что отмечается и при анализе снимков реальных событий. Наблюдаемое для ряда следов отклонение шлейфа к югу в наших расчетах не проявлялось.

Приведенные выше оценки и результаты численного моделирования позволяют построить следующую физическую картину образования видимых на снимках следов от падения крупных осколков кометы. Следы (за исключением серповидной области) представляют собой возмущение верхних слоев облачного покрова Юпитера. Начальным источником возмущения является УВ, возникшая в результате торможения и взрыва кометного вещества ниже зоны облачности, а также всплывающий огненный шар. Это возмущение далее развивается в крупномасштабный атмосферный вихрь тайфунного типа, частично аккумулирующий в себя энергию тепловой атмосферной конвекции. Из этого атмосферного вихря в дальнейшем формируется вихрь Россби, однако его энергетика оказывается не достаточно для перехода в сверхдолгоживущее образование типа Большого красного пятна или Коричневых овалов. Образовавшееся возмущение эволюционирует в течение примерно месяца, вытягиваясь в широтном направлении, теряя свою интенсивность и вихревую специфику. Заметим, что контрольные расчеты, в которых учитывался только перенос начального возмущения горизонтальными ветровыми течениями, дали значительно больший, чем в расчетах с учетом β -эффекта и чем на рис. 16 перенос начального возмущения вдоль широты, что указывает на существенную стабилизирующую роль вихря Россби в процессе эволюции следа.

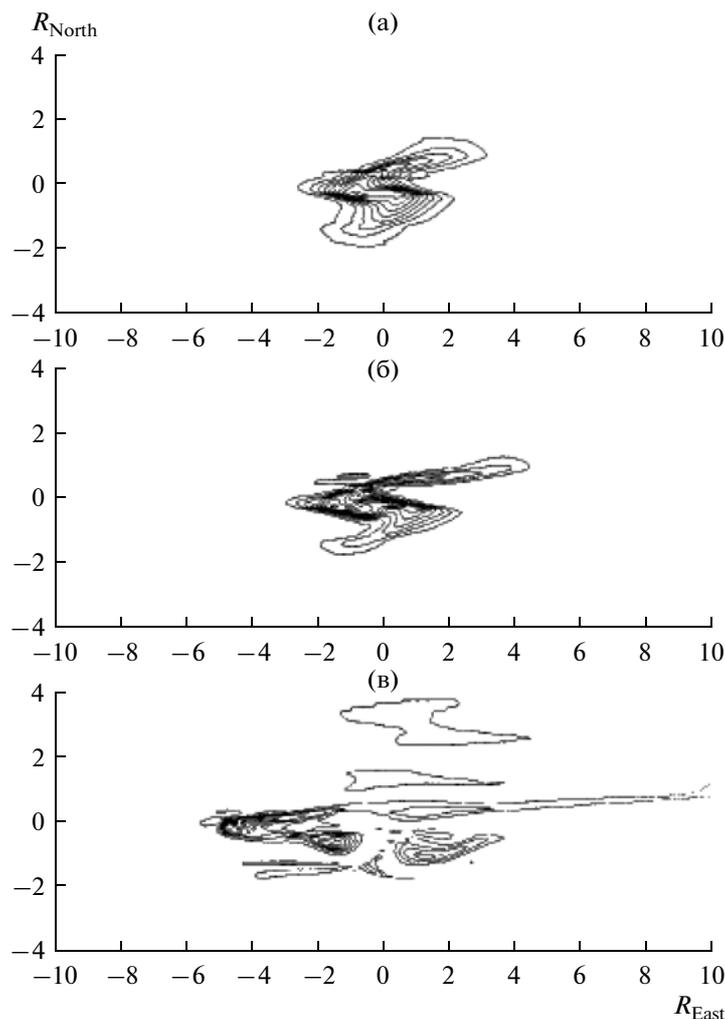


Рис. 18. Поля потенциальной температуры после падения осколка с энергией $E_0 \approx 1030$ эрг в различные моменты времени: (а) $t = 6$, (б) $t = 10$, (в) $t = 30$. Ось ординат направлена на север, расстояния указаны в радиусах Россби, время (выражено в земных сутках).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что столкновение с телами, аналогичными Челябинскому метеориту, считается достаточно редким для Земли событием, раз в 100 лет, и обычно не сопровождается пострадавшими, следует отметить, что оно достаточно типично для Земли, — в силу того, что огромные территории у нас либо слабо заселены, либо покрыты водой, и данные события проходят незамеченными.

Ежедневно тысячи метеоров вторгаются и сгорают в земной атмосфере, как мы уже отметили выше по многим причинам, из-за большой скорости входа в атмосферу и малости размеров, и, к счастью для нас, невысокой прочности при больших размерах, и только очень малая их часть достигает поверхности, позволяя нам по этим остаткам изучать особенности не только данных инцидентов, но и получать данные по строению нашей Солнечной системы. Огромная масса новой ин-

формации о строении атмосферы Юпитера была получена в процессе наблюдений его столкновения с кометой Шумейкеров—Леви.

Остается открытым вопрос о реальных размерах Челябинского метеорита и его исходной прочности, тем не менее по результатам моделирования можно сделать несколько выводов:

- метеороид обладал невысокой исходной прочностью, не выше 5 МПа;

- очень пологий угол входа в атмосферу позволил ему проникнуть в нее достаточно глубоко, до высот порядка 20 км, в случае более крутого угла атаки он разрушился бы выше;

- начиная с высоты порядка 35 км началось стремительное разрушение метеороида, его поперечный размер начал быстро увеличиваться, лобовое сопротивление воздуха нарастать, соответственно он начал стремительно тормозиться, что и привело к его взрыву на высоте 23 км.

— образовавшаяся после взрыва ударная волна достигла поверхности Земли, где и причинила, к счастью, незначительные разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fireball and bolide reports. <http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/>.
2. Катастрофические воздействия космических тел (Под ред. В.В. Адушкина, И.В. Немчинова) М.: ИКЦ "Академкнига", 2005. 310 с.
3. Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
4. Popova O., Borovicka J., Hartmann W. K., Spurny P., Gnos E., Nemtchinov I., Trigo-rodriguez J.M. Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // Meteoritics & Planetary Science. 2011. V. 46. № 10. P. 1525–1550.
5. Brown P., 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.
6. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. Аэродинамика болидов. М.: Физмалит, 1995.
7. Турский Г.А. Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет // Соросовский образовательный журнал. 2000. V. 6. № 5. с. 76–82.
8. Fortov V.E., Goel B., Munz C.-D., Ni A., Shutov A., Vorobiev O.Yu. Numerical simulation of nonstationary fronts and interfaces by the Godunov method in moving grids // Nuclear Science and Engineering. 1996. V. 123. P. 169–189.
9. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
10. Колган В.П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Ученые записки ЦАГИ. Т. 3. № 6. С. 68–77.
11. Chapman C.R., Morrison D. Impacts on the earth by asteroids and comets: assessing the hazard // Nature. 1994. V. 367. P. 33–40.
12. Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction // Science. 1980. V. 208. № 4448. P. 1095–1108.
13. Shoemaker C.S., Shoemaker E.M., Levy D.H., Scotti J.V., Bendjoya P., Mueller J. Comet Shoemaker-Levy (1993e) // IAU Circ. V. 5725. 1993.
14. McCrosky R.E., Shao C.-Y., Tatum J.B., Balam D.D. Comet Shoemaker-Levy (1993e) // IAU Circ. 1993. V. 5726. P. 1.
15. Weaver H.A., A'Hearn M.F., Arpigny C., Boice D.C., Feldman P.D., Larson S.M., Lamy P., Levy D.H., Marsden B.G., Meech K.J. et al. The Hubble Space Telescope (HST) observing campaign on comet Shoemaker-Levy 9 // Science. 1995. V. 267. № 5202. P. 1282–1288.
16. Melosh H.J., Schenk P. Split comets and the origin of crater chains on Ganymede and Callisto // Nature. 1993. V. 365. P. 731–733.
17. Шульман Л.М. Ядра комет. М.: Наука, 1987. 232 с.
18. Фортвов В.Е., Гнедин Ю.Н., Иванов М.Ф., Ивлев А.В., Клунов Б.А. Столкновение кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером: что мы увидели // УФН. 1996. Т. 166. № 4. С. 391–422.
19. Клунов Б.А., Кондауров В.И., Конюхов А.В., Медведев Ю.Д., Сокольский А.Г., Утюжников С.В., Фортвов В.Е. Столкновение кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером: что мы увидим? // УФН. 1994. Т. 164. № 6. С. 617–629.
20. Waddington G. Simulation of the Nuclear Train of Comet Shoemaker-Levy 9 // The Astronomer. 1993. V. 30. P. 135.
21. Sekanina Z., Chodas P.W., Yeomans D.K. Tidal disruption and the appearance of periodic comet Shoemaker-Levy 9 // Astron. Astrophys. 1994. V. 289. P. 607–636.
22. Hammel H.B., Beebe R.F., Ingersoll A.P., Orton G.S., Simon A.A., Chodas P., Clarke J.T., De Jong E., Dowling T.E. et al. HST imaging of atmospheric phenomena created by the impact of comet Shoemaker-Levy 9 // Science. 1995. V. 267. № 5202. P. 1288–1296.
23. Клунов Б.А., Кондауров В.И., Конюхов А.В. Моделирование долговременных последствий столкновения кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером // Докл. РАН. 1994. Т. 337. № 2. С. 28–35.
24. Ingersoll A.P., Kanamori H. Waves from the collisions of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter // Nature. 1995. V. 374. P. 706–708.
25. Orton G., A'Hearn M., Baines K., Deming D., Dowling T., Goguen J., Griffith C., Hammel H., Hoffmann W., Huntten D. et al. Collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter observed by the NASA infrared telescope facility // Science. 1995. V. 267. № 5202. P. 1277–1282.
26. Мусеев С.С., Сагдеев П.З., Тур А.В., Хоменко Г.А., Шукуров А.М. Физический механизм усиления вихревых возмущений в атмосфере // Докл. АН СССР. 1983. Т. 273. № 2. С. 549–553.
27. Чемберлен Д. Теория планетных атмосфер. М.: Мир, 1981. 352 с.
28. Нелено Б.А., Гришин Г.А., Куенко Ю.П., Коваль А.Д. Оптические методы спутниковой гидрофизики. Киев: Наукова Думка, 1987. 144 с.
29. Педлоски Д. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир, 1984. Т. 1. 398 с., Т. 2. 416 с.
30. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере: Инфразвук и гравитационные волны в атмосфере — их возникновение и распространение. М.: Мир, 1978. 532 с.