

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Столкновение кометы Шумейкер–Леви 9 с Юпитером: что мы увидим?

Б.А. Клумов, В.И. Кондауров, А.В. Конюхов, Ю.Д. Медведев,
А.Г. Сокольский, С.В. Утюжников, В.Е. Фортгов

В июле 1994 г. произойдет грандиозное космическое событие: комета Шумейкер–Леви-9 столкнется с Юпитером. Вхождение кометы в атмосферу Юпитера будет сопровождаться быстрым выделением энергии — взрывом. Освобождаемая при взрыве энергия порядка 10^7 мегатонн тротилового эквивалента превышает весь накопленный человечеством ядерный потенциал в тысячи раз. В данной статье обсуждаются некоторые характерные особенности взаимодействия кометы с Юпитером и возможные последствия этого столкновения.

PACS numbers: 196.50.Gn, 96.30

Содержание

Введение (617).

1. Предварительные сведения (618).
 2. Комета Шумейкер–Леви 9. Историческая справка (619).
 3. Взрыв кометы в атмосфере Юпитера: качественные особенности и результаты численного моделирования (621).
 4. Возмущения в верхней атмосфере и магнитосфере Юпитера (627).
- Заключение (629).
Список литературы (629).

Введение

16 июля 1994 г. в 22 ч 30 мин по московскому времени первый осколок кометы Шумейкер–Леви 9 [1] войдет в плотные слои атмосферы Юпитера [2]. Согласно расчетам других авторов это событие произойдет на два дня позже — 18 июля 1994 г. [3–7], но мы уверены, что это

расхождение не является принципиальным, поскольку телескопы всего земного шара (включая орбитальный космический телескоп Хаббла) будут направлены на Юпитер задолго до столкновения.

Пристальное наблюдение и изучение кометы Шумейкер–Леви началось сразу же после ее открытия 24 марта 1993 г.: работы, посвященные этой комете, стали появляться в научной периодике чуть ли не каждый день. Тема предстоящего столкновения кометы с Юпитером попала на телевидение и страницы крупнейших газет мира.

Почему же всех так интересует событие, которое произойдет так далеко от нас — на расстоянии примерно 600 млн. километров? Это интересно не только потому, что человечество с незапамятных времен интересовалось событиями, происходящими в космосе, но также и потому, что столкновение, подобное этому, может стать печальной реальностью и для Земли.

Столкновение подобной кометы или астероида с Землей маловероятно — по оценкам [8] такое событие происходит один раз в миллион лет. Но нам пока не дано знать, когда точно это произойдет: возможно еще через миллион лет, и не исключено, что и в нашем столетии. Напомним, что комета Шумейкер–Леви была открыта всего за 16 месяцев до ее столкновения с Юпитером.

Столкновение подобной кометы с Землей привело бы к катастрофическим последствиям: предсказываемая мощность взрыва кометы Шумейкер–Леви при ее торможении в атмосфере Юпитера составляет $\sim 10^{22-24}$ Дж, или $\sim 10^{6-8}$ мегатонн тротилового эквивалента. Эта величина в десять тысяч раз больше накопленного на Земле ядерного потенциала и примерно соответствовала бы 250 миллионам бомб, сброшенных на Хиросиму. Распространены представления, согласно которым в результате столкновения астероида или крупной кометы с Землей (диаметр $D \sim 10$ км, освобождаемая в результате взрыва энергия $\sim 10^{24}$ Дж $\sim 10^8$ мегатонн) 65 млн. лет назад произошло запыление атмосферы, изменение климата и вымирание мезозойских групп

Б.А. Клумов. Институт динамики геосфер РАН, 117334, Москва, Ленинский проспект, 38/6
Тел. (095) 939-79-89. Факс (095) 137-07-11
E-mail: idg@glas.apc.org

В.И. Кондауров, В.Е. Фортгов. Институт высоких температур РАН, 127412, Москва, Ижорская, 13/19
Тел. (095) 485-79-89. Факс (095) 485-79-90
E-mail: fort@hedric.msk.su

А.В. Конюхов, С.В. Утюжников. Московский физико-технический институт, 141700, г. Долгопрудный, Моск. обл., Институтский пер., 9
Тел. (095) 408-89-89. Факс (095) 408-53-36
E-mail: svu@cnm.mipt.su

Ю.Д. Медведев, А.Г. Сокольский. Институт теоретической астрономии РАН, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10
Тел. (812) 279-06-67. Факс (812) 272-79-68
E-mail: sokolsky@iipah.spb.su

Статья поступила 21 апреля 1994г.

Таблица I

Организация	Инструмент	Наблюдательная задача
САО РАН	6 м-телескоп	Спектроскопия сверхвысокого разрешения, быстрая фотометрия
ГАО РАН	МТМ-500 (Ассы-Тургень, Казахстан) Фотометр-поляриметр	Спектроскопия, спектрофотометрия
ГАС ГАО	ФП-ЗУ на 1м-телескопе	восьмицветная (UBV-R1JHK) фотометрия и поляриметрия
ГАИШ	1,5 м-телескоп (Майданак, Казахстан)	Фотометрия, спектроскопия
КраО	0,6 м-телескоп (Крым, Украина)	Фотометрия, спектроскопия
	0,4 м-двойной астрограф (Крым, Украина)	Астрометрия
РАИ АНУ	1,2 м-телескоп (Крым, Украина)	Спектроскопия, поляриметрия
	2,6 м-телескоп ЗТШ (Крым, Украина)	ПЗС-наблюдения, изображения
	25 м-радиотелескоп (Харьков, Украина)	Радионаблюдения на частотах 10–25 МГц

животных [9–10]. Отметим также, что мощность взрыва широко известного Тунгусского метеорита (диаметром ~ 30 м) оценивается примерно в 30–50 мегатонн тротилового эквивалента, т.е. в миллион раз меньше мощности взрыва кометы Шумейкер–Леви. По оценкам [8] падение на Землю метеоритов, подобных Тунгусскому, происходит один раз за 200–300 лет.

Поэтому необходимо понимать, как происходит процесс подобных столкновений и каковы его последствия для крупных планет Солнечной системы. С этой точки зрения столкновение кометы Шумейкер–Леви с Юпитером может дать ценную информацию не только о Юпитере, но и о характере взрывного взаимодействия крупных комет и метеоритов с атмосферами планет, информацию, которая может оказаться необходимой в будущем.

Таким образом, можно считать, что со времени падения Тунгусского метеорита ученые не получали столь ценного объекта для своих наблюдений, правда, затрудненных тем, что столкновение произойдет с невидимой нам стороной Юпитера. Это обстоятельство лишает нас возможности прямых визуальных наблюдений процесса столкновения, и поэтому актуальным становится вопрос о том, какие наблюдательные данные необходимы нам для того, чтобы восстановить картину происшедшего.

Описание многих из рассматриваемых в настоящей статье процессов не является строгим. Это связано с тем, что процесс столкновения кометы Шумейкер–Леви с Юпитером обнаруживает настолько богатую физику, что подробное изложение всей проблемы на страницах журнала не представляется возможным.

Наблюдать последствия столкновения планируют многие профессиональные астрономы. Из наиболее перспективных планов наблюдений с территории СНГ упомянем программы, которые были начаты по гранту РФФИ, предоставленному Международному институту

проблем астероидной опасности (Санкт-Петербург) (табл. I).

В силу слабости объекта даже на упомянутых инструментах провести наблюдения будет не просто. Тем более важно иметь надежную эфемериду и модель столкновения кометы Шумейкер–Леви с Юпитером. Описанию первых результатов в этой проблеме и посвящена данная статья.

1. Предварительные сведения

Уже первые астрономические наблюдения [1] дали размер кометы — примерно 10 км в поперечнике. Сейчас известно, что комета сильно фрагментирована — существует предположение, что приливные силы разорвали комету в момент сближения ее с Юпитером [2,11]. Согласно наблюдательным данным комета состоит примерно из 20 частей, причем самые крупные фрагменты имеют размер порядка 1–10 км в поперечнике [1–7]. Процесс столкновения частей кометы Шумейкер–Леви с Юпитером будет длиться почти неделю: с 16 по 21 июля [2], согласно другим данным [6–7] в период с 18 по 24 июля. Сам процесс столкновения более всего похож на бомбардировку Юпитера глыбами льда (с вкрапленной в них космической пылью), падающими под углом примерно 45° к поверхности Юпитера со скоростью $v_i \cong 64\text{--}65 \text{ км с}^{-1}$. Плотность кометного вещества, по видимому, варьируется в пределах $\rho_i \sim 0,3\text{--}3 \text{ г см}^{-3}$, а размеры фрагментов: $D_i \sim 300\text{--}3 \text{ км}$. В настоящий момент надежно установлена только скорость падения, поэтому возникающая неопределенность в значениях плотности кометного вещества и размера фрагментов приводит к значительной (до двух порядков величины) неопределенности в значениях массы фрагмента и его кинетической энергии.

Благодаря высокой скорости вращения Юпитера (период вращения равен 10 ч) и длительности процесса столкновения следует ожидать, что взрывному воздействию подвергнутся различные области юпитерианской атмосферы.

Если же учесть, что фрагменты кометы, будучи разных размеров, высвобождают свою энергию на разных высотах, то появляется уникальная возможность зондирования атмосферы Юпитера, как минимум, в двух измерениях: по высоте и долготе. Это, в частности, дает возможность определить, насколько устойчивы крупномасштабные течения на Юпитере. Отметим, что энергия, заключенная в вихревом движении знаменитого Большого Красного Пятна Юпитера ($\sim 10^{26}$ эрг) [12], уступает энергии взрыва даже небольшого фрагмента размером $D_i \sim 100 \text{ м}$.

Процесс торможения отдельного фрагмента кометы в атмосфере качественно можно представить следующим образом. Заметное торможение начнется тогда, когда вытесненная фрагментом масса воздуха будет сопоставима с массой фрагмента. Торможение осколка в экспоненциальной атмосфере ($\rho(h) \cong \rho_0 e^{-h/H(h)}$, где H — так называемая шкала высот однородной атмосферы) приведет к тому, что основная часть кинетической энергии кометы выделится в столбе воздуха высотой $\sim H$, площадью поперечного сечения $\sim D_i^2$.

В атмосфере Юпитера на высотах, где происходит торможение крупных фрагментов кометы, $H \cong 50 \text{ км}$.

Поскольку заметная часть кинетической энергии фрагмента высвобождается за времена $\tau \sim H/v_i \cong 1$ с, торможение фрагмента кометы в атмосфере Юпитера носит характер взрыва.

В работах [13–15], которые появились практически сразу же после сообщения о том, что вероятность столкновения кометы с Юпитером достаточно велика, рассматривались первые минуты после взрыва отдельного фрагмента, т.е. исследовались короткоживущие вспышки оптического излучения, сопровождающей взрыв и поведение облака взрыва на ранней стадии. Отметим сильный разброс в результатах численных расчетов, например давления атмосферного газа, при которых происходит взрыв фрагмента, варьировались в зависимости от модели, описывающей торможение осколка примерно от 100 бар до 50 мбар. Они соответствуют диапазону высот от –250 км до 100 км юпитерианской атмосферы [16,17].¹

Различие указанных результатов может быть принципиальным, поскольку на высотах от ~ 0 до ~ 40 км расположен облачный покров, экранирующий оптическое излучение.

Как мы уже говорили, сам процесс столкновения виден с Земли не будет, поскольку фрагменты кометы падают на обратную сторону Юпитера — предсказываемое место падения фрагментов соответствует примерно 45° южной широты. Период вращения Юпитера составляет около 10 ч, поэтому место падения кометы будет доступно для наблюдения примерно через час. В случае падения фрагмента недалеко от терминатора (граница между освещенной и неосвещенной сторонами) это время может быть меньше.

В связи с этим особый интерес представляет поиск долгоживущих последствий столкновения, которые могут быть исследованы радиофизическими и оптическими средствами наземного и спутникового базирования. Из космоса за процессом столкновения кометы Шумейкер–Леви с Юпитером будет наблюдать космический телескоп Хаббла, который, в частности, сможет зарегистрировать электромагнитное излучение, недоступное для наземных обсерваторий и, возможно, проливающее новое свет на характер соударения.

Кратко перечислим возможные наблюдаемые следствия столкновения кометы Шумейкер–Леви с Юпитером, которые будут обсуждаться ниже:

образование в атмосфере Юпитера долгоживущих вихревых образований с масштабами порядка тысячи километров;

вспышки оптического излучения, сопровождающие взрывы фрагментов;

генерация внутренних гравитационных волн поднимающимся облаком взрыва, стимулирующих конденсацию на высотах тропосферы и образование аномального облачного покрова;

возмущения ионосферы и магнитосферы Юпитера после взрыва кометы в атмосфере;

аномалии в радиоизлучении из радиационных поясов Юпитера, в частности в силовой трубке магнитного поля, проходящей через точку взрыва;

особенности свечения ионосферы и верхней атмосферы в оптическом, ИК и радиодиапазонах.

2. Комета Шумейкер–Леви 9. 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 Шумейкер–Леви 9" [1]. Уже первые пластинки с изображением 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 $11''$ [3]. 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 [1] было дано 5 точных астрометрических положений кометы, относящихся к середине изображения этой кометы. 27 марта Лу и Дживитт сообщили [4] об исследовании изображения кометы, в котором они зафиксировали 17 отдельных фрагментов, располагавшихся в виде полосы длиной $50''$. В дальнейшем это число увеличилось до 21. В настоящее время устойчиво наблюдаются 19 фрагментов этой кометы, вытянутой в одну линию наподобие "жемчужного ожерелья" (рис. 1) [18]. Комета Шумейкер–Леви очень слабый по яркости небесный объект, ее интегральная звездная величина колеблется в пределах звездной величины 14–15. При этом звездные величины отдельных фрагментов на 6–7 звездных величин больше, т.е. они отражают примерно в 100 раз меньше света, чем вся комета. Поэтому наблюдение отдельных фрагментов возможно только на больших телескопах с использованием приборов зарядной сети (ПЗС-матриц), позволяющих регистрировать очень слабые потоки света. Обработка первых астрометрических наблюдений 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. В табл. II приведены даты и углы падений (между вектором скорости и местной вертикалью) фрагментов на поверхность Юпитера (отметим, что принятая в литературе нумерация осколков обратна времени падения, время падения указано по Гринвичу, в долях суток июля 1994 г.).

Скорость падения фрагментов варьируется в пределах $64\text{--}65 \text{ км с}^{-1}$. На основании гипотезы о разрыве кометы приливными силами в момент очень тесного ее сближения с Юпитером сделаны оценки размеров для 8 наиболее крупных осколков (17,15,14,12,11,7,5,1) [2]. Оказалось, что максимальный размер фрагмента порядка 1 км. Предполагаемая плотность кометного

¹ Принято, что высота юпитерианской атмосферы отсчитывается от уровня, на котором давление окружающего воздуха равняется 1 бар, т.е. соответствует атмосферному давлению на Земле; таким образом, в юпитерианской атмосфере существуют "положительные" и "отрицательные" высоты.

Таблица II

Номер фрагмента	Дата падения (UT)	Угол падения, °	Номер фрагмента	Дата падения (UT)	Угол падения, °
21	16,76	44,99	10	—	—
20	17,07	44,85	9	20,37	44,29
19	17,19	44,61	8	20,39	44,15
18	17,41	44,88	7	20,75	44,62
17	17,59	44,67	6	21,17	44,46
16	17,98	44,83	5	21,61	44,62
15	18,26	44,87	4	21,57	44,54
14	18,77	44,88	3	21,87	44,44
13	—	—	2	22,11	44,25
12	19,38	44,73	1	22,27	44,66
11	19,88	44,70			

вещества $0,3-3 \text{ г см}^{-3}$. Ввиду неопределенности величины плотности вещества, размеров и формы осколков ошибка оценки массы (и, соответственно, кинетической энергии) одного осколка может достигать одного-двух порядков. Отметим, что масса фрагментов может быть уточнена после проведения фотометрических наблюдений непосредственно перед падением на Юпитер. Предварительно вычисленное место падения осколков находится на обратной стороне Юпитера в районе 45° южной широты. Следует отметить, что небесспорной является и принятая теория происхождения этого загадочного объекта. Одно из конкурентоспособных предположений заключается в том, что это не захваченная Юпитером

комета (т.е. объект, вращавшийся вокруг Солнца), а выброшенный Юпитером около 22 лет назад "протуберанец", который за это время совершил 10 оборотов по почти полярной орбите, а на предыдущем витке в 1992 г. был "разорван" на части приливными силами из-за тесного сближения с Юпитером. На рис. 2-4 представлена ретроспективная эволюция йовицентрических элементов 12-го фрагмента, наиболее близкого к центру полосы фрагментов и поэтому, вероятно, имеющего орбиту, наиболее близкую к орбите "материнского" тела. На рис.2 представлена эволюция перигелийного расстояния. Здесь по оси абсцисс отложено время в годах, по оси ординат — перигелийное расстояние, выраженное в средних радиусах Юпитера ($71\,400 \text{ км}$). На рис. 3 и 4 представлены эволюции эксцентриситета и наклона орбиты к плоскости эклиптики (эклиптика и равнод. даты 2000,0). Рисунки показывают, что орбита кометы Шумейкер–Леви неустойчивая и ее начало и конец замыкаются на поверхности Юпитера. Поэтому, если эти вычисления в результате уточнения орбит фрагментов в дальнейшем качественно не изменятся, они могут стать экспериментальным подтверждением гипотезы Всехсвятского [19,20] о происхождении короткопериодических комет в Солнечной системе. Согласно его теории короткопериодические кометы образуются в недрах Юпитера или его спутников и затем в результате вулканической или иной деятельности выбрасываются в нашу Солнечную систему.

Таким образом, комета Шумейкер–Леви имеет сложную фрагментированную структуру, при этом велика неопределенность как в размере кометы, так и в значении ее плотности. Поэтому ниже с помощью качественных рассуждений и численного моделирования мы попытаемся оценить масштабы воздействия одного из крупных фрагментов при его торможении в атмосфере Юпитера. При этом мы надеемся, что особенности взаимодействия кометы с атмосферой Юпитера будут отражены с достаточной содержательностью.

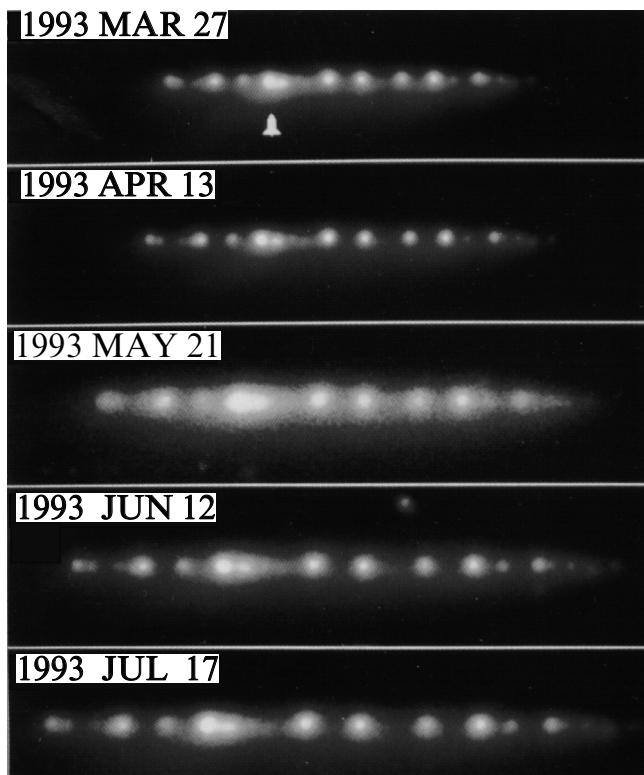


Рис. 1. Комета Шумейкер–Леви 9 [18]

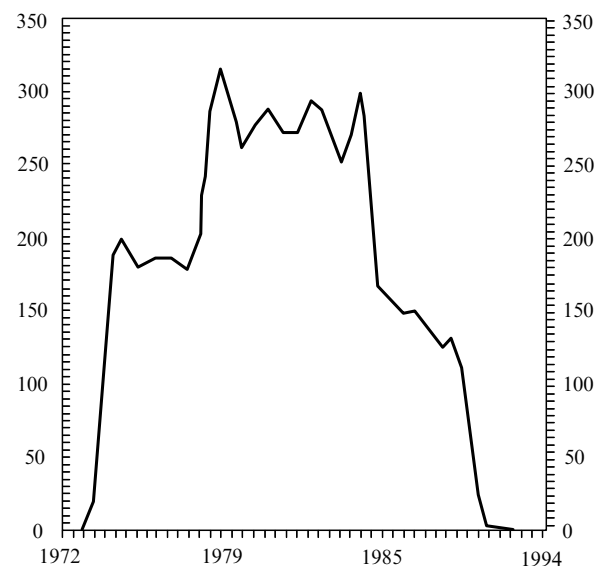


Рис. 2. Эволюция перигелийного расстояния (выраженного в средних радиусах Юпитера) для 12-го фрагмента кометы Шумейкер–Леви 9.

3. Взрыв кометы в атмосфере Юпитера: качественные особенности и результаты численного моделирования

Вхождение кометы в атмосферу Юпитера, плотность и давление которой возрастают с глубиной по экспоненциальному закону, приведет к интенсивным механическим 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 ударносжатый слой, будет заполнена атмосферным газом с примесями паров вещества кометы, сжатым до давлений в несколько тысяч атмосфер и разогретым до температур порядка 10 000 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 ударносжатом 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 ударносжатом слое к теплоте испарения кометного вещества для рассматриваемого случая не превышает долей м с^{-1} .

Действительно, воспользуемся широко применяемым в метеоритике уравнением, описывающим изменение массы фрагмента в процессе его торможения в атмосфере [21]:

$$Q_i \frac{dM_i}{dt} = -\frac{1}{2} C_q \rho_h v_i^3 S_i, \quad (1)$$

где M_i , v_i , S_i — масса, скорость и площадь максимального поперечного сечения фрагмента кометы, ρ_h — плотность набегающего потока юпитерианского воздуха, Q_i — эффективная удельная теплота испарения материала фрагмента, C_q — безразмерный коэффициент, описывающий тепловой поток, подводимый к фрагменту.

Если учесть, что коэффициент C_q из-за малой прозрачности смеси атмосферного газа с парами твердого тела в ударносжатом слое представляет собой величину порядка 10^{-2} – 10^{-4} [22], то для ледяных фрагментов ($\rho_i \sim 1 \text{ г см}^{-3}$, $Q_i \sim 10^6 \text{ эрг г}^{-1}$) диаметром $D_i \cong 1 \text{ км}$, движущихся со скоростями $v_i \cong 60 \text{ км с}^{-1}$, придем к указанной выше оценке.

Из уравнения (1) видно также, что заметное уменьшение массы фрагмента за счет испарения начнется на высотах, где плотность окружающего юпитерианского воздуха $\rho_a \sim 10^{-5} \text{ г см}^{-3}$ примерно на 60 км выше уровня облаков. Это важно, поскольку в случае экранировки облаками продуктов взрыва кометы можно надеяться, что удастся извлечь некоторую информацию из наблюдений за следом кометы. В частности, укажем на возможность характерного свечения кометного вещества в верхней атмосфере Юпитера.

Основное влияние на движение фрагмента кометы будут оказывать механические нагрузки, действующие со стороны ударносжатого слоя. Их действие проявится в виде явлений торможения, разрушения и неупругого (пластического) деформирования фрагмента.

Торможение фрагмента кометы в атмосфере Юпитера, обусловленное аэродинамическим сопротивлением набегающего потока, можно проанализировать, используя простейшее уравнение движения

$$M_i \frac{dv_i}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho_h v_i^2 S, \quad (2)$$

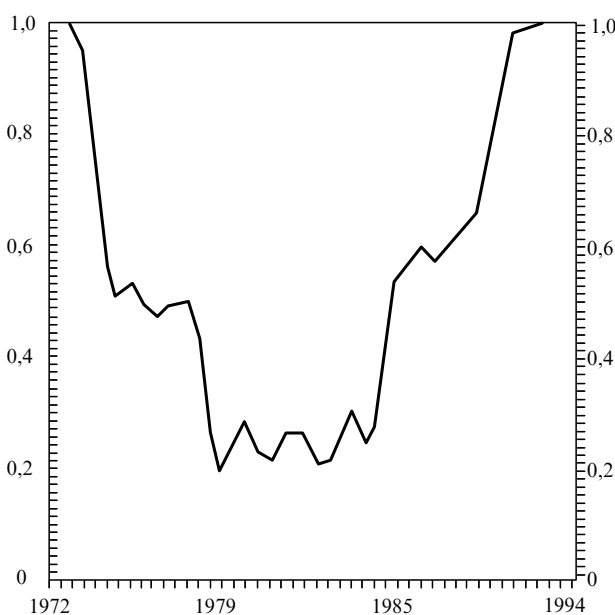


Рис. 3. Эволюция эксцентриситета орбиты 12-го фрагмента кометы Шумейкер–Леви.

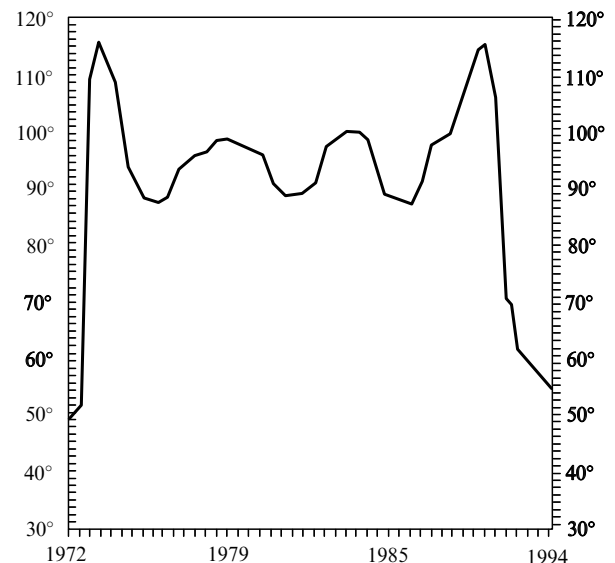


Рис. 4. Эволюция наклона орбиты к эклиптике 12-го фрагмента кометы Шумейкер–Леви.

где C_x — безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления (остальные обозначения те же, что и в уравнении (1)). Заметное торможение начнется в плотных слоях атмосферы Юпитера, где плотность ρ_h равна

$$\rho_h \sim \frac{2\rho_i D_i \cos \theta}{3C_x H}. \quad (3)$$

Здесь ρ_i — плотность кометного вещества, θ — угол входа кометы в атмосферу (по отношению к местной вертикали), H — шкала высот атмосферы Юпитера в точке торможения. Полагая $\rho_i \cong 1 \text{ г см}^{-3}$, $D = 1 \text{ км}$, $\theta = 45^\circ$, $H \cong 75 \text{ км}$, получим, что основное торможение будет происходить при плотности окружающей среды $\rho_s \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ г см}^{-3}$ и давлении $p_s \cong 90 \text{ бар}$. Отметим, что эти параметры соответствуют высоте $h_s \cong -235 \text{ км}$ юпитерианской атмосферы. Таким образом, фрагмент кометы проникнет значительно ниже уровня облаков (которые расположены на уровне $p \sim 0,3\text{--}1 \text{ бар}$).

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. Модели такого рода рассматривались в [23]. С ростом газодинамических нагрузок при движении в глубь 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 $\rho_* \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ г см}^3$, что соответствует высотам $\sim 100 \text{ км}$ 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 газообраз-

ной) 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. В качестве примера приведем более эффективное торможение дроби по сравнению с пулей, при прочих равных условиях. Рассыпание фрагмента вызывает, в свою очередь, резкое возрастание теплового потока (обратно пропорционального радиусу кривизны обтекаемого фрагмента) в силу 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 быстротекающий 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.

Перед облаком, так же как и на ранней стадии (до взрыва), движется сильная ударная волна, опережающая его приблизительно на одну десятую радиуса облака.

Торможение кометы будет сопровождаться вспышкой оптического излучения, генерируемого как ударной волной, так и горячими продуктами взрыва. При скоростях входа порядка 60 км с^{-1} температура ударносжатого слоя может достигать $2\text{--}3 \text{ эВ}$ [24].

Энергию излучения оптического диапазона при вспышке можно по порядку величины оценить как $0,1\%$ энергии взрыва [21]. Для фрагмента кометы размером 1 км , учитывая время торможения $\tau \sim 1 \text{ с}$, оцениваем мощность вспышки: $\sim 10^{26} \text{ эрг с}^{-1}$. Отметим, что на Юпитер падает поток солнечного излучения $J \sim 8 \cdot 10^{24} \text{ эрг с}^{-1}$ и примерно половина отражается (для видимого света альbedo Юпитера $\cong 0,5$). Следовательно, торможение кометы воспринималось бы как яркая вспышка даже при ее падении на освещенную сторону Юпитера. Поскольку падение фрагментов кометы Шумейкер–Леви произойдет на неосвещенную сторону Юпитера, эту вспышку мы сможем увидеть только в том случае, если взрыв фрагмента произойдет недалеко от терминатора. При этом мы сможем увидеть рассеянное атмосферой Юпитера излучение вспышки, которое будет восприниматься нами как зарница. Необходимо отметить, что облачный покров Юпитера будет частично экранировать это излучение.

Есть еще один способ увидеть вспышку излучения, а именно, постараться пронаблюдать излучение вспышки,

отраженное от какого-нибудь спутника Юпитера при его благоприятном расположении. В этом случае спутник будет работать как зеркало, доставляющее на Землю информацию о взрыве кометы.

При этом надо сравнить поток солнечного излучения, отраженного от спутника, с потоком отраженного от спутника излучения вспышки, сопровождающей взрыв кометы. Для наиболее известного спутника Юпитера Ио это дает: величина потока отраженного солнечного излучения $J_s \sim 2,5 \cdot 10^{21}$ эрг с^{-1} (полагаем альбедо Ио равным 0,5), а величина потока отраженного излучения вспышки $J_e \sim 2 \cdot 10^{19}$ эрг с^{-1} , т.е. $J_e/J_s \cong 8 \cdot 10^{-3}$; следовательно, вспышки, сопровождающие взрыв крупных фрагментов кометы Шумейкер–Леви в случае, когда это излучение не экранируется облачным покровом, вполне наблюдаемы. Отметим, что на спутнике Метис (это ближайший к Юпитеру спутник) отношение J_e/J_s будет выше на порядок (хотя абсолютные значения потоков будут значительно ниже, поскольку радиус Метиса всего 10 км).

Ниже представлены некоторые результаты численного моделирования газодинамических процессов, возникающих после взрыва одного из фрагментов кометы, входящего в атмосферу Юпитера с начальной скоростью 60 км с^{-1} по нормали к поверхности Юпитера. Предполагалось, что сферический фрагмент радиуса 1 км, имеющий начальную плотность $\rho_i = 1$ г см^{-3} , взрывается на высоте $h_s = -150$ км ($p_s \cong 30$ бар, $\rho_s \cong 1,8 \cdot 10^{-3}$ г см^{-3}).

Численные расчеты показывают, что это предположение не является принципиальным для оценки долговременных атмосферных последствий и обусловлено малым изменением кинетической энергии метеорита в

верхних слоях атмосферы.

Скорость фрагмента непосредственно перед взрывом полагалась равной 50 км с^{-1} , давление газа в облаке p_0 в начальный после взрыва момент времени считалось равным давлению на линии торможения, которое имеет место при обтекании твердого фрагмента ($p_0 \cong \rho_s v^2$).

В расчетах применялась цилиндрическая система координат (r, z) с осью z , направленной против вектора силы тяжести.

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. 5,а приводятся изолинии температуры, на рис. 5,б — поле скоростей для момента времени 0,6 с после взрыва. Максимум температуры находится в ударном слое между головной ударной волной и метеоритным облаком и соответствует примерно 22 000 К. Максимальная скорость в газодинамическом потоке $v_{\text{max}} = 42$ км с^{-1} . 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.

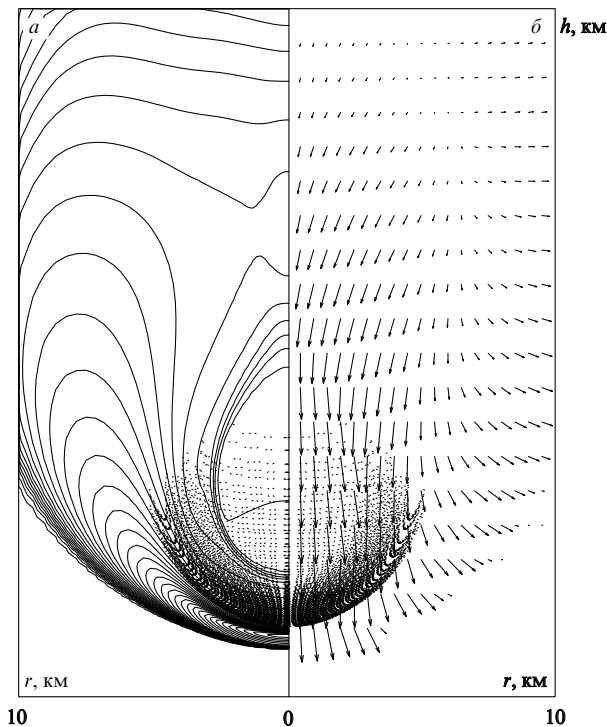


Рис. 5. а — Изолинии температуры. б — Поле скоростей через 0,6 с после взрыва кометы на высоте $h = -150$ км (атмосферное давление $p \cong 31$ бар). Точки на рисунке — маркеры, относящиеся к частицам фрагмента кометы. Максимальная скорость потока $v_{\text{max}} = 42$ км с^{-1}



Рис. 6. Изолинии радиальной составляющей скорости потока, соответствующей моменту времени $t = 1$ с после взрыва

За время $t \cong 1$ с облако газа (рис. 6), образованного из вещества кометы, существенно увеличивается до размера $R \cong 7$ км, интенсивно взаимодействуя с набегающим (относительно облака) потоком атмосферного газа. Для этого момента времени характерно образование всеякого 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 $v_{\max} = 38 \text{ км с}^{-1}$. 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. 6 представлены изолинии радиальной составляющей скорости, соответствующие $t \cong 1$ с. Хорошо виден отход скачка уплотнения от оси симметрии в хвостовой части облака.

На рис. 7 изображены изолинии температуры (рис. 7,а) и поле скоростей (рис. 7,б) для момента времени $t = 4$ с. К этому моменту времени наблюдается значительное торможение облака, так что максимальная скорость потока составляет 19 км с^{-1} . 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 $t \cong 6$ с после взрыва (рис. 8) передний фронт облака практически затормозился и движется со скоростью около 1 км с^{-1} , но газ в хвостовой части продолжает интенсивное движение вниз с максимальной скоростью потока до 8 км с^{-1} . Радиус облака равен 10 км. На рис. 8 хорошо видно образование вихревого кольца. Основная масса вещества оказывается втянутой в ядро вихря, образующего тор. Ядро вихря движется вниз со скоростью 4 км с^{-1} . При этом на периферии облака газ поднимается вверх со скоростью 1 км с^{-1} . Облако кометы достигает минимальной высоты $h_{\min} \cong -240$ км, что соответствует давлению $p_{\max} \cong 100$ 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 слабозвмущенной атмосфере).

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

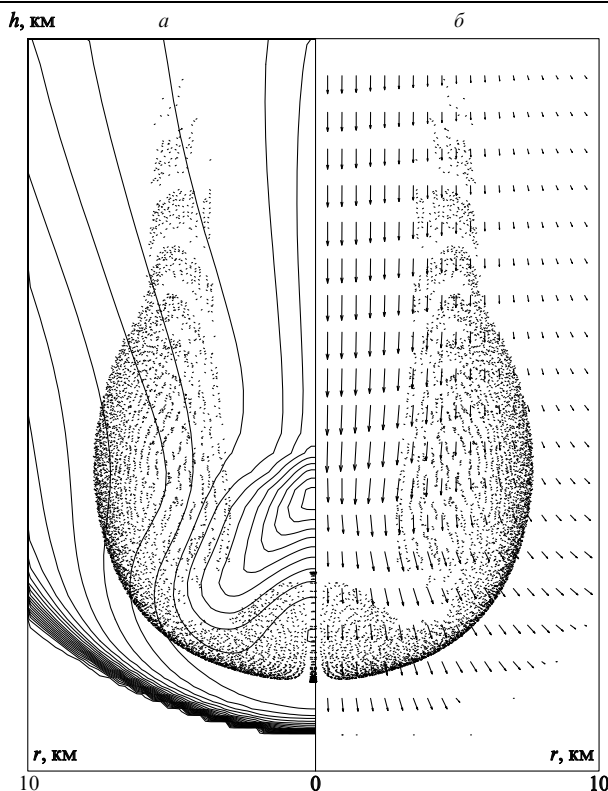


Рис. 7. а — Изолинии температуры. б — Поле скоростей через 4 с после взрыва кометы. Точки на рисунке — маркеры, относящиеся к частицам фрагмента кометы. Максимальная скорость потока $v_{\max} = 19 \text{ км с}^{-1}$

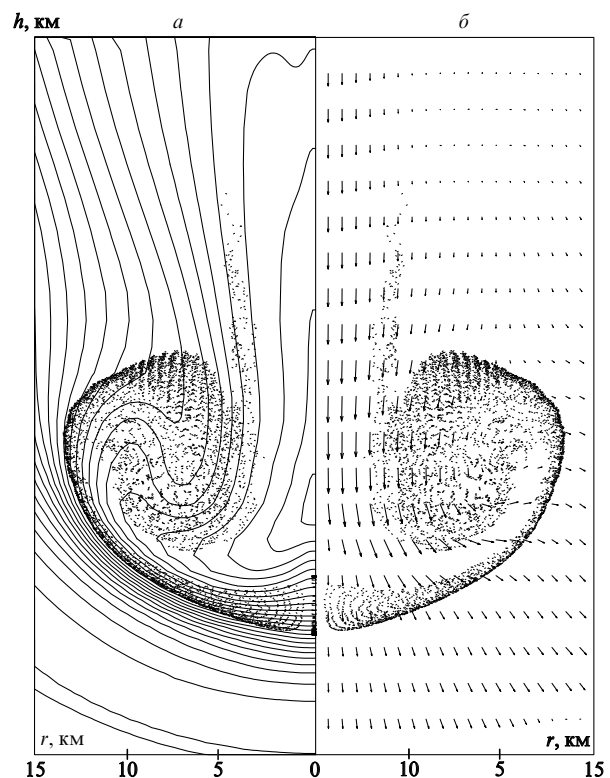


Рис. 8. а — Изолинии температуры. б — Поле скоростей через 6 с после взрыва кометы. Момент полного торможения фронта облака и максимального погружения в атмосферу Юпитера. Положение фронта облака соответствует высоте $h = -240$ км и давлению $p = 100$ бар

существенным турбулентное перемешивание.

При расчете стадии вспышки термика атмосфера выше высоты взрыва h_s считалась невозмущенной и влияние следа фрагмента не учитывалось. Тем самым моделируются долговременные последствия наклонного входа фрагмента в атмосферу Юпитера, так как в этом случае облако под действием архимедовой силы будет всплывать в невозмущенном газе.

При вспышке термиков обычно наблюдают две качественно различные картины течения. В одном случае наблюдается сворачивание газа в крупномасштабное, отчетливо выраженное, всплывающее вихревое кольцо, в другом случае имеет место образование струйного течения, направленного вверх. Реализация того или иного сценария зависит от различных факторов, но в первую очередь — от высоты образования термика. Заметим, что в атмосфере Земли граница между двумя возможными картинами течения соответствует высоте, примерно равной 40 км. На рис. 9 приводятся поля скоростей, изотермы и распределение частиц вещества кометы для момента времени $t = 40$ с. На данной стадии наблюдается сильно выраженное струйное течение, направленное вверх и вовлекающее новые массы атмосферного воздуха. При этом максимальная скорость подъема газа равна $3,5 \text{ км с}^{-1}$. Заметим, что основная часть вещества кометы собирается не на оси, а в вихре на расстоянии 5–15 км от оси. Высота, вдоль которой распределилось вещество кометы, включая шлейф, составляет диапазон от -180 до -130 км. Колонка восходящего газа имеет диаметр порядка 40 км и состоит лишь на 10–15% из вещества кометы. Вещество кометы во время вспышки облака как бы поджимается, так как нижние слои имеют большую скорость, чем верхние.

Через 1,5 мин по-прежнему наблюдается струйное течение. Облако вещества кометы постепенно изменяет топологию, собираясь в "диск" радиусом 30 км. Максимальная скорость газа достигает 4 км с^{-1} .

С течением времени движение газа замедляется, и на поздней стадии (близкой к моменту завихрения облака) важное влияние на процесс формирования облака начинает оказывать турбулентное перемешивание, которое учитывалось в расчетах с применением k - ϵ -модели [25].

К моменту времени 6 мин после взрыва наблюдается формирование облака из продуктов взрыва, которое занимает область до 100 км по радиусу и 50 км по высоте. Облако всплывает на высоту 250 км, которая существенно выше высоты формирования естественных облаков Юпитера. Максимальная температура газа в восходящем потоке около 700 К. Хотя максимальная скорость подъема составит 500 м с^{-1} , облако в дальнейшем уже практически не всплывает и наблюдается его завихрение.

На рис. 10 представлены данные, соответствующие моменту времени 10 мин. Всплытие газового облака практически прекратилось. Температура газа не превышает 500 К. Облако продуктов кометы на этой стадии медленно растекается в горизонтальном направлении. Радиус облака составляет 150 км, а средняя высота завихрения составляет примерно 250 км.

Расчеты, соответствующие моменту времени 1 ч после взрыва (рис. 11), показывают, что к этому времени параметры газа в облаке и в окружающей среде практически выравниваются (по температуре, например, с

точностью до десятков градусов). Изменения обусловлены продолжающимся медленным растеканием облака, включающего продукты кометы. Радиус облака составляет уже 200 км. При этом его толщина практически не возрастает, так как энергия турбулентного перемешивания в вертикальном направлении в основном идет на работу против сил тяжести. В дальнейшем облако может растечься на несколько тысяч километров. Заметим, что расчеты проводились в предположении, что облако поднимается по невозмущенной атмосфере при отсутствии ветра. Наличие интенсивных конвективных потоков в атмосфере Юпитера может существенно исказить полученную выше картину.

Таким образом, торможение и взрыв фрагмента кометы в атмосфере Юпитера приводит к образованию облака и его быстрому подъему за счет архимедовой силы до высот мезосферы $h \cong 250 \text{ км}$ ($p_h \cong 1,6 \cdot 10^{-5}$ 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: $\rho_c \sim \rho_i D^3 / D_f^2 h_f \sim 10^{-9} \text{ г см}^{-3}$. 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 Шумейкер–Леви, а точнее, каждый ее достаточно крупный фрагмент, по крайней мере, в течение нескольких часов после взрыва. "Увидеть" это облако мы сможем по характерной флуоресценции кометного вещества. Этот вопрос будет обсужден в следующем разделе.

Выше с помощью численного моделирования мы рассмотрели судьбу облака, образованного при взрыве достаточно крупного фрагмента кометы $D_i \cong 1 \text{ км}$. Ответим на вопрос, с какой степенью точности эти результаты применимы к поведению облаков взрыва от более мелких фрагментов (имеющих характерные размеры $D_i \sim 100 \text{ м}$)?

Скорость подъема нагретого облака v_{cl} можно определить, используя следующую формулу:

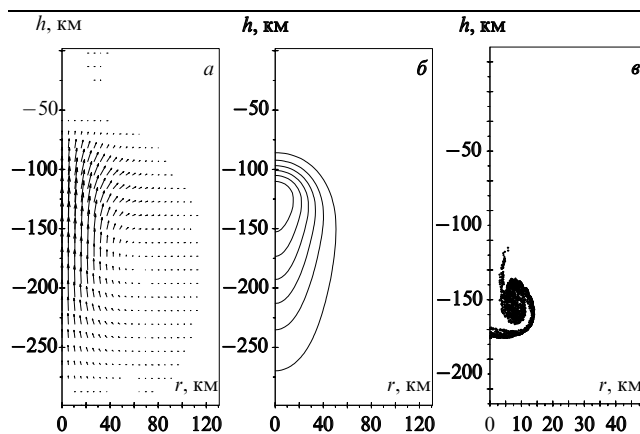


Рис. 9. a — Поле скоростей. b — Изолинии температуры (изолинии приводятся с шагом 150 К). v — Маркеры, соответствующие веществу кометы, через 40 с после взрыва

$$v_{cl} \cong \sqrt{gD_{cl}}, \quad (5)$$

где D_{cl} — размер облака, g — ускорение свободного падения (на Юпитере $g \cong 25 \text{ м с}^{-2}$). В свою очередь для начального размера облака легко получить:

$$D_{cl} \sim \left(\frac{E}{p_s}\right)^{1/3} \propto \frac{D_i}{p_s^{1/3}} \quad (6)$$

где E — энергия взрыва.

Учитывая, что давление окружающего воздуха на высоте взрыва $p_s \propto D_i$, получаем, что скорость подъема облака $\propto D_i^{1/3}$, т.е. слабо зависит от начального размера фрагмента.

Перепад высот, который облако взрыва преодолевает, $\Delta h_{cl} \cong v_{cl}^2/2g \sim D_i^{2/3}$. Отметим, что крупные фрагменты кометы проникают глубже в атмосферу Юпитера, чем более мелкие, поэтому высоты, на которых произойдет торможение и тех, и других фрагментов, не должны слишком сильно отличаться друг от друга для размеров фрагмента $D_i \sim 100 \text{ м} - 1 \text{ км}$.

Поэтому следует ожидать, что все двадцать фрагментов кометы Шумейкер–Леви займут свое место в атмосфере Юпитера на высотах $\sim 200 \text{ км}$. Высоты, на которых будет происходить зависание облаков разных фрагментов, будут незначительно отличаться друг от друга — произойдет дифференциация фрагментов по высотам. Нам важно лишь то, что все эти облака будут существенно выше облачного покрова и за ними можно будет наблюдать.

Возникает законный вопрос: неужели при таком мощном взрыве единственное, что мы можем наблюдать, — это только слабое свечение и флуоресценция кометного вещества в верхней атмосфере Юпитера под

действием солнечного излучения?

А если зональные течения разорвут облако взрыва на части, то регистрация и этого излучения может быть затруднена.

Существует механизм, действие которого мы на качественном уровне опишем ниже и который, на наш взгляд, способен "проявить" особенности торможения крупных фрагментов кометы Шумейкер–Леви в атмосфере Юпитера. Речь пойдет о внутренних гравитационных волнах. Эти волны можно представить себе как вертикальные смещения атмосферных слоев под действием силы тяжести. На Земле внутренние гравитационные волны эффективно возбуждаются, например, при лесных пожарах. Отметим, что в гидродинамике такие волны называются волнами плавучести.

Образно говоря, когда возбуждена внутренняя гравитационная волна, атмосфера "дышит".

При взрыве фрагмента кометы в атмосфере Юпитера и последующем всплывании облака взрыва эффективно генерируются внутренние гравитационные волны с длиной волны λ больше или порядка размера облака: $\lambda \geq D_{cl}$. Теперь представим себе, что в процессе вертикального переноса, вызванного волной, слой воздуха попадает в область, где температура существенно ниже, чем температура воздуха в указанном слое. Если возможна конденсация, то образуется характерный облачный покров, причем его образование, как мы считаем, стимулировано прохождением внутренней гравитационной волны, которая в свою очередь возбуждена облаком взрыва. В тропосфере Юпитера ($p \sim 1-0,1$ бар) наблюдается уменьшение температуры с ростом высоты. Характерный атмосферный масштаб (шкала высот) на уровне тропосферы равен $H \sim 25 \text{ км}$. Скорость распространения внутренней гравитационной волны v_w можно оценить из соотношения: $v_w \cong \lambda N/2\pi$, где N — частота Брента–Вясселя [26]:

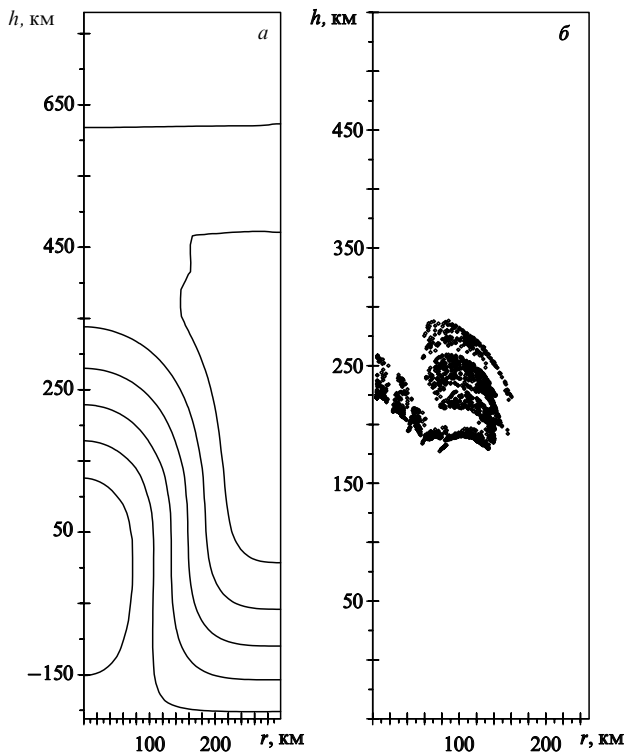


Рис. 10. *a* — Изолинии температуры (изолинии температуры приводятся с шагом 65 К). *б* — Маркеры, соответствующие веществу кометы, через 10 мин после взрыва.

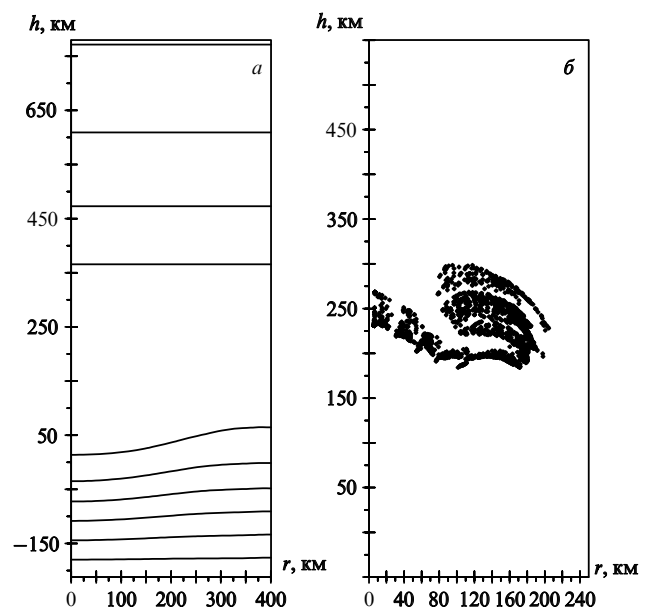


Рис. 11. *a* — Изолинии температуры. *б* — Маркеры, соответствующие веществу кометы, через 1 ч после взрыва

$$N^2 \cong (\gamma - 1) \frac{g^2}{c_a^2}. \quad (7)$$

где γ — показатель адиабаты, c_a — скорость звука.

В тропосфере Юпитера $v_w \sim 200 \text{ м с}^{-1}$.

Крупные осколки кометы Шумейкер–Леви тормозятся значительно ниже тропосферных высот. Однако при прохождении тропосферы фрагментом до взрыва длина возбуждаемой волны (как и ее амплитуда) порядка размера самого фрагмента $\sim 1 \text{ км}$. Поскольку затухание γ этих волн обратно пропорционально квадрату длины возбуждаемых волн ($\gamma \propto \lambda^{-2}$), то такими коротковолновыми возмущениями вполне можно пренебречь.

Естественно считать, что более эффективно внутренние гравитационные волны возбуждаются, когда облако взрыва (размер облака на этих высотах порядка 70 км) пересекает в процессе подъема тропосферу, а не при пересечении тех же высот осколком кометы до взрыва.

Если обратиться к результатам численного моделирования, то можно обратить внимание на сильное увеличение размеров облака взрыва к моменту прохождения тропосферы: $D_{cl} \sim 70 \text{ км}$, причем газ внутри облака горячий — его температура составляет $\sim 1000 \text{ К}$. При этом на этих высотах амплитуда волны $\sim D_{cl} \geq H \cong 25 \text{ км}$, так что процессы конденсации и стимулированное образование облаков будут проходить в тропосфере Юпитера с большой вероятностью.

Следовательно, в тропосфере будет возбуждена "волна аномальной облачности", которая, распространяясь от эпицентра со скоростью $v_w \sim 200 \text{ м с}^{-1}$, охватит через $\tau \sim 5 \text{ ч}$ (когда это можно будет увидеть) масштабы $\sim v_w \tau \sim 5000 \text{ км}$, т.е. размер примерно такой же, как и у Большого Красного Пятна Юпитера. Отметим, что на этих временах затуханием внутренней гравитационной волны можно пренебречь.

Реальная картина, конечно же, будет гораздо сложнее, особенно если учесть, что в тропосфере значительна естественная облачность, которая может нивелировать этот эффект.

С другой стороны, если горячее облако взрыва, пересекая тропосферу, проходит через слой естественных облаков (расположенный на высотах $h \sim 0\text{--}40 \text{ км}$), то облако взрыва "выжигает" дырку в облачном покрове размером $\sim D_{cl} \cong 70 \text{ км}$; поэтому через пять часов, если, конечно, это место не будет затянуто облаками, место вхождения фрагмента в атмосферу может быть обнаружено. В случае, когда фрагменты кометы взрываются выше тропосферы, этот эффект будет отсутствовать.

Следовательно, наблюдая за изменением облачного покрова в тропосфере, можно получить информацию как о свойствах тропосферы Юпитера, так и о характере торможения крупных фрагментов кометы Шумейкер–Леви и уточнить координаты входа фрагментов в атмосферу.

4. Возмущения в верхней атмосфере и магнитосфере Юпитера

Атмосфера Юпитера на высотах, где тормозится облако взрыва, состоит главным образом из молекулярного водорода (примерно 10% приходится на долю гелия). "Увидеть" облако взрыва мы можем по характерному

свечению кометного вещества, которое возбуждается под действием солнечного излучения. Два процесса делают облако наблюдаемым: резонансное рассеяние, когда фотон поглощается атомами и молекулами и переизлучается с той же энергией, и флуоресценция, при которой энергия излучаемого фотона меньше энергии поглощенного.

Через час после взрыва облако на $\sim 90\%$ состоит из юпитерианского воздуха и на $\sim 10\%$ из кометного вещества. При этом параметры окружающего воздуха примерно следующие: $\rho \sim 10^{-8} \text{ г см}^{-3}$, $p \sim 6 \cdot 10^{-5} \text{ бар}$, а плотность кометного вещества в облаке составляет $\sim 10^{-9} \text{ г см}^{-3}$.

Будем предполагать, что комета состоит из льда, так что главное излучение облака определяется молекулами воды и кислорода, а также, возможно, и продуктами их реакций, и рассмотрим вклад в излучение, вносимый молекулами воды, кислорода и гидроксила. Вопрос об излучении металлов, которые могут составлять определенную часть кометного вещества, будет рассмотрен отдельно.

При повороте Юпитера к Солнцу стороной, на которой произошло столкновение, участки атмосферы, содержащие кометное вещество, будут флуоресцировать под действием солнечного излучения и, тем самым отличаться по спектральным характеристикам от окружающей естественной атмосферы Юпитера, практически лишенной молекул воды и кислорода на этих высотах.

Важно отметить следующее обстоятельство: мы не претендуем на детальное описание спектра излучения облака. Мы просто подчеркиваем, что облако будет светиться под действием падающего на него солнечного излучения и эту флуоресценцию (и резонансное рассеяние), по-видимому, можно будет зарегистрировать.

Конечно, в плотных слоях атмосферы Юпитера (в тропосфере) присутствуют молекулы воды и кислорода, однако в этих слоях они находятся при давлении примерно 1 бар, где происходит эффективное тушение возбужденных молекул в столкновениях и излучение отсутствует. На этих высотах гораздо более эффективно рэлеевское рассеяние падающего солнечного излучения без поглощения фотона.

Для того чтобы наблюдать излучение при переходах из j -го возбужденного состояния, необходимо, чтобы выполнялось неравенство $A_j \geq \nu \propto \rho$, где A_j^{-1} — время жизни j -го возбужденного состояния, ν — частота столкновений возбужденных атомов или молекул, приводящих к тушению возбуждения.

Облако взрыва, содержащее молекулы воды и кислорода, согласно результатам численного исследования, тормозится на высотах, где тушение рассматриваемых нами излучений мало. Сначала рассмотрим излучение метастабильных составляющих кометного облака. Видимое излучение облака взрыва определяется в основном атомом кислорода: эмиссия $O(^1S)$ генерируется при переходе $O(^1D \rightarrow ^1S)$, длина волны излучения 5577 \AA . Это излучение соответствует так называемой "зеленой линии", возбуждение которого визуальное можно наблюдать в полярных сияниях на Земле. Время жизни состояния $O(^1S)$ по отношению к радиативному распаду примерно 1 с.

Оценим поток излучения I_j , которое генерируется облаком взрыва одного из фрагментов кометы и который можно будет попытаться зарегистрировать на

Земле:

$$I_j = \frac{n_j}{4\pi R_{je}^2} A_j V; \quad (8)$$

V — объем излучателя (излучатель — облако взрыва считается оптически тонким для рожденного в нем излучения), n_j, A_j^{-1} — концентрация атома (или молекулы) в j -м состоянии и его время жизни, R_{je} — расстояние от Юпитера до Земли ($\sim 6 \cdot 10^8$ км). Чтобы оценить поток излучения I_{5577} на длине волны 5577 Å, необходимо знать n_{5577} , порядок величины которой можно определить, используя наблюдательные значения n_{5577} для атмосферы Земли на высотах $h \sim 85$ –100 км. Подобная аналогия представляется приемлемой для грубой численной оценки величины потока I_{5577} , поскольку концентрации атомарного кислорода в облаке взрыва на Юпитере и в атмосфере Земли на указанных высотах одного порядка. Следует также учесть ослабление потока солнечного излучения на Юпитере в 25 раз по сравнению с Землей. Это дает для величины потока излучения I_{5577} с длиной волны 5577 Å значение $\sim 10^{-3}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$.

Это означает, что каждые час на единицу поверхности Земли (на один квадратный сантиметр) падает примерно три "зеленых" фотона из кометного облака. Отметим, что днем на поверхность Земли падает поток излучения с длиной волны 5577 Å $I_{5577} \sim 10^9$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, т.е. на двенадцать порядков интенсивнее. Это излучение рождается в атмосфере Земли на высотах примерно 90–100 км, когда под действием солнечного излучения происходит фотодиссоциация молекулярного кислорода. Ночью интенсивность I_{5577} на порядок ниже, образование O(1 S) происходит уже на высотах ~ 250 км в результате диссоциативной рекомбинации иона O $_2^+$. Обнаружить на таком фоне три юпитерианских фотона (и это еще оценка сверху) чрезвычайно сложно².

Таким образом, для наблюдения облака взрыва либо надо искать линии и полосы излучения, которые отсутствуют в атмосфере Земли, а присутствуют в облаке взрыва (для кометы, состоящей в основном из льда, таких эмиссий скорее всего просто нет), либо следует пытаться зарегистрировать излучение облака взрыва со спутников, которые должны располагаться на высотах, где фоновое излучение ионосферы Земли в наблюдаемых линиях и полосах будет сильно ослаблено.

Такое излучение, на наш взгляд, может принадлежать гидроксилу, концентрации которых на больших высотах атмосферы Земли незначительны. Речь идет о полосе 3090 Å системы OH(A $^2\Sigma^+$ —X 2). Концентрация гидроксила в облаке взрыва может быть значительной и доходить до $\sim 10^{12}$ см $^{-3}$. Объемная интенсивность излучения равна $i_j = A_j n_j = n g_j$, где n_j — концентрация гидроксила, g_j — так называемый излучательный фактор, учитывающий возбуждение полосы 3090 Å под действием солнечного излучения. Для юпитерианского гидроксила излучательный фактор полосы 3090 Å g_j порядка $5 \cdot 10^{-5}$ с $^{-1}$ [27].

Для величины потока излучения I_{3090} с длиной волны 3090 Å, регистрируемого на Земле, это дает значение $\sim 10^2$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, т.е. оно на пять порядков интенсивнее, чем излучение в линии 5577 Å.

Эти цифры дают повод для осторожного оптимизма, особенно если будет возможность провести измерения на высотах, где фоновое излучение гидроксила практически отсутствует (для ионосферы Земли это соответствует высотам $h \geq 150$ км).

Наблюдения резонансного рассеяния и флуоресценции наиболее эффективны для разрешенных переходов, поскольку в этом случае время жизни возбужденного состояния крайне мало. Для большинства химических элементов энергия фотонов, необходимая для возбуждения таких переходов, лежит в области вакуумного ультрафиолета, где интенсивность солнечного излучения сильно убывает, поэтому и излучательные факторы таких переходов малы. Ситуация кардинально меняется при возбуждении линий металлов, имеющих небольшие энергии резонансных переходов. Это в первую очередь относится к металлам, линии которых возбуждаются излучением оптического диапазона, таким, как натрий (линия 5890 Å), литий (линия 6708 Å), калий (линия 7699 Å). Излучательные факторы этих переходов могут быть очень велики, так что, если даже количество атомов этих металлов в кометном веществе незначительно, указанные линии могут давать высокие интенсивности. Например, если комета Шумейкер–Леви содержит в своем составе 0,1% натрия, интенсивность линии 5890 Å на Земле $\sim 10^4$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ вполне наблюдаема наземными оптическими средствами.

Отметим, что вероятность нахождения металлов в кометном веществе достаточно высока, так что соответствующие линии могут присутствовать в спектре излучения облака взрыва.

Если при взрыве кометы происходит выброс струи (состоящей как из кометного вещества, так и из захваченного атмосферного газа) в мезосферу и термосферу Юпитера (это происходит, когда диаметр фрагмента больше или порядка 1 км), то в случае, когда струя ионизирована даже в небольшой степени, ее движение в магнитном поле Юпитера приводит к генерации низкочастотного излучения, которое может привести к наблюдаемым возмущениям магнитосферы и, в частности, к вариациям в радиоизлучении внутренних радиационных поясов.

Магнитное поле Юпитера с требуемой нам точностью можно описать в дипольном приближении, считая при этом, что ось диполя совпадает с осью вращения. Тогда легко получить, что экваториальная точка силовой линии магнитного поля, пересекающей поверхность Юпитера на широте λ , находится на расстоянии r_0 от центра Юпитера:

$$r_0 = \frac{R_J}{\cos^2 \lambda} \quad (9)$$

где радиус Юпитера $R_J \cong 70000$ км.

Для силовой линии на широте взрыва ($\lambda \cong 45^\circ$ S) $r_0 \cong 2R_J$. Область магнитосферы $1,3 \leq r_0 \leq 3R_J$ является источником нетеплового дециметрового электромагнитного излучения ($f \geq 300$ МГц) [16]. Это высокочастотное радиоизлучение объясняется синхротронным излучением релятивистских электронов, захваченных магнитным полем планеты. Характерные энергии реля-

² Отметим, что в некоторых работах исследуются еще более тонкие эффекты, которые возможно будут сопровождать взрыв кометы Шумейкер–Леви [27].

тивистских электронов, генерирующих это радиоизлучение, порядка 10–20 МэВ. Электроны с такими энергиями двигаются вдоль силовых линий магнитного поля Юпитера, осциллируя между зеркальными точками с баунс-периодом τ_b порядка одной секунды. Поскольку пробочное отношение для силовой трубки, проходящей через точку взрыва, равно ~ 16 , часть быстрых электронов, находящаяся в конусе потерь, будет высыпаться из магнитной ловушки и гибнуть в верхней атмосфере Юпитера.

В интенсивности дециметрового радиоизлучения из внутренних радиационных поясов Юпитера практически не наблюдаются спорадические всплески, поэтому принято считать, что внутренние радиационные пояса Юпитера устойчивы: сток быстрых частиц через торцы магнитной ловушки компенсируется релятивистскими электронами, которые попадают в ловушку посредством радиальной диффузии из областей более слабого магнитного поля.

Низкочастотные магнитогидродинамические волны (например, альфвеновские), которые, как мы полагаем, будут генерироваться в магнитной трубке, проходящей через точку взрыва, имеют характерные частоты, соизмеримые с τ_b^{-1} ; поэтому следует ожидать, что высыпания релятивистских электронов будут промодулированы с частотой возбуждаемых альфвеновских волн. Соответственно и интенсивность излучения релятивистских электронов в указанной магнитной силовой трубке, также будет промодулирована с указанной частотой. Это достаточно тонкий эффект, но мы надеемся, что его можно будет обнаружить наземными радиофизическими средствами.

Заключение

Мы рассмотрели взрыв кометы Шумейкер–Леви в атмосфере Юпитера в основном на качественном уровне. Зависание облаков взрыва на больших высотах атмосферы Юпитера дает определенные шансы для их наблюдения. Можно ожидать значительных изменений в структуре облачного покрова Юпитера на высотах тропосферы, в частности, считаем возможным наблюдение стимулированной "волны" аномальной облачности в тропосфере. Со спутников возможно наблюдение флуоресценции облака взрыва. В магнитосфере Юпитера возможны вариации потока дециметрового излучения в силовой трубке магнитного поля, проходящей через точку взрыва кометы. Однако ясно, что реальная картина столкновения кометы Шумейкер–Леви с Юпитером

окажется существенно богаче сегодняшних теоретических предсказаний, и наблюдательные данные, которые будут в скором времени получены, внесут свои коррективы в наши представления о характере взаимодействия крупных комет с атмосферами планет.

Благодарности

Авторы признательны за полезные дискуссии А.И. Яремчуку, а также благодарны Г.В. Лосевой за предоставление данных по атмосфере Юпитера и М.В. Мещерякову за помощь в проведении численных расчетов.

Список литературы

1. Marsden B *IAU Circ.* 5725 (1993)
2. Chernetenko Yu A, Medvedev Yu D *Planet. and Space Sci.* (1994) (in press)
3. Marsden B *IAU Circ.* 5726 (1993)
4. Marsden B *IAU Circ.* 5729 (1993)
5. Marsden B *IAU Circ.* 5730 (1993)
6. Nakano S *IAU Circ.* 5800 (1993)
7. Carusi A, Yeomans D K *IAU Circ.* 5807 (1993)
8. Chapman C R, Morrison D, *Nature* **367** 33 (1994)
9. Alvarez L, Alvarez W, Asaro F, Michel H V *Science* **208** 1095 (1980)
10. Shoemaker E M *Rev. Earth and Planet. Sci.* **11** 463 (1983)
11. Scotti J V, Melosh M H *Nature* **365** 733 (1993)
12. Незлин М В, Снежкин Е Н *Вихри Россби и спиральные структуры* (М.: Наука, 1990)
13. Zahnle K, Low M *Icarus* (1994) (in press)
14. Sekanina Z *Science* **382** 262 (1993)
15. Ahrens T J, Takata T, O'Keefe J D *Bull. Am. Astron. Soc.* **25** 1043 (1993)
16. *Юпитер* (Под ред. Герельса Т.) (М.: Мир, 1979) т. 1–3
17. Loseva T V, Nemtchinov I V In *Proceeding of LPSC-25* (Houston, 1994) p. 987
18. Anderson C M *Planet. Rep.* **14** (1) 9 (1994)
19. Wsechswyatsky S *Astron. Nachrichten* **240**, 273, (1930)
20. Всехсвятский С К *Природа и происхождение комет и метеорного вещества* (М.: Просвещение, 1967)
21. Бронштэн В А *Физика метеорных явлений* (М.: Наука, 1981)
22. Биберман Л М, Бронин С Я, Брыкин М В *ТВТ* **17** (1) 84 (1979)
23. Григорян С С *Косм. исследования* **6** 875 (1979)
24. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966)
25. Launder V E, Spalding D V *Mathematical Models of Turbulence* (New York: Academic Press, 1972)
26. Госсард Э, Хук У *Волны в атмосфере* (М.: Мир, 1978)
27. Harrington J, LeBeau R, Baskes K, Dawling T *Nature* **368**, 525 (1994)
28. Краснопольский В А *Физика свечения атмосфер планет и комет* (М.: Наука, 1987)

COLLISION OF A COMET SHOEMAKER–LEVI 9 WITH JUPITER: WHAT SHALL WE SEE?**B.A. Klumov**

Institute for Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, 38/6, Leninskii Prospekt, 117334, Moscow, Russia

Tel. (095) 939-7989. Fax (095) 137-0711

E-mail: idg@glas.apc.org

V.I. Kondaurov, V.E. Fortov

Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, 13/19, Izhorskaya Ulitsa, 127412, Moscow, Russia

Tel. (095) 485-7989. Fax (095) 485-7990

E-mail: fort@hedric.msk.su

A.V. Konyukhov, S.V. Utyuzhnikov

Moscow Institute of Physics and Technology, 9, Institutskii Pereulok, 141700, Dolgoprudnyi City, Moscow Region, Russia

Tel. (095) 408-8989. Fax (095) 408-5336

E-mail: svu@cnm.mipt.su

Yu.D. Medvedev, A.G. Sokolsky

Institute of Theoretical Astronomy, Russian Academy of Sciences, 10, Naberezhnaya Kutuzova, 191187, St. Petersburg, Russia

Tel. (812) 279-06-67. Fax (812) 272-7968

E-mail: sokolsky@iipah.spb.su

In July 1994 dramatic cosmic event will take place: comet Shoemaker-Levi 9 will collide with Jupiter. The entry of the comet into the atmosphere of Jupiter will be accompanied by a fast energy release and an explosion will take place. The energy released during the explosion, of the order of 10^7 Mt, will exceed by some thousands fold the total nuclear potential accumulated by mankind. Some characteristics of interaction of the comet with Jupiter are discussed and possible consequences of the collision are outlined.

Bibliography — 29 references

Received 21 April 1994