

4) наиболее вероятным представляется столкновение с землей Аризоны железного (железоникелевого) метеороида с диаметром 59 м и скоростью вторжения в атмосферу 11 км/с под углом 30° к поверхности планеты;

5) учитывая раздробление метеороида на относительно крупные фрагменты (не менее 3–4 м), можно уверенно полагать, что абляция не смогла бы существенно отразиться на конечных результатах.

4.2. Распад МКТ при «транзите»

4.2.1. Распад астероида типа Икара в атмосфере Земли

В настоящее время в средствах массовой информации периодически появляются сообщения о возможности соударения астероида с Землей. Одной из таких публикаций явилась, например, статья академика РАЕН В. Полеванова «Икар возвращается... и может «нокаутировать» Землю» (газета «Труд–7» от 23.01.1998). О том, какое несчастье может принести столкновение астероида с Землей, говорит пример Чиксулубской катастрофы (см. п. 4.1.3). Но, оказывается, и транзитный пролет астероида через атмосферу может представлять серьезную опасность для нас. Покажем это на примерах, используя методику расчетов из гл. 2 и 3 (п. 2.2 и 3.2). Результаты этого исследования опубликованы в [30].

Как известно, орбиты Земли и астероида Икар пересекаются, и периодически эти тела сближаются. Очередное сближение ожидается в 2006 г. Принято, что МКТ, подобное Икару, состоит из горной породы с $\rho_b = 3500 \text{ кг/м}^3$, $C_b = 5900 \text{ м/с}$ и $K_{IC}^2 = 10^{12} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$, имеет сферическую форму с диаметром $D_0 = 1,5 \text{ км}$ и входит в атмосферу Земли со скоростью $V_{-\infty} = 70 \text{ км/с}$. Такое значение $V_{-\infty}$ возможно при встречном движении Земли и МКТ, если его собственная скорость составляет 40 км/с. При этом кинетическая энергия МКТ, движущегося относительно Земли, составит $U_0 \approx 1,5 \cdot 10^{22} \text{ Дж}$ ($\approx 3,6 \cdot 10^{12} \text{ т ТНТ}$).

Расчеты фрагментации МКТ проведены по методике, изложенной в гл. 2 (см. п. 2.2). Результаты расчетов для частного случая $z_0 = 70$ км приведены в табл. 4.13. На рис. 4.6 приведена зависимость $\delta U(z)$, показывающая, что по данному параметру взаимодействие МКТ с атмосферой делится на 2 стадии.

Таблица 4.13

Распад МКТ типа Икар при «транзите» через атмосферу Земли (горная порода, $K_{IC}^2 = 10^{12}$ Па²·м, $V_{-\infty} = 70$ км/с, $z_0 = 70$ км)

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	l_k , км	τ_k	δU_k , %
1	19,3	69999,984	1190,6	622,3	–	0,00005
2	18,4	69999,984	944,9	12,1	1,1	0,00005
3	17,5	69999,977	750,0	12,4	1,4	0,00007
4	16,6	69999,969	595,3	12,7	1,8	0,00009
5	15,6	69999,961	472,5	13,1	2,3	0,00011
6	14,7	69999,945	375,0	13,5	3,0	0,00016
7	13,8	69999,930	297,6	13,9	3,9	0,00020
8	12,9	69999,898	236,2	14,4	5,1	0,00029
9	11,9	69999,859	187,5	14,9	6,7	0,00040
10	11,0	69999,797	148,8	15,5	8,8	0,00058
11	10,1	69999,711	118,1	16,2	11,5	0,00083
12	9,2	69999,578	93,8	16,9	15,2	0,00121
13	8,2	69999,383	74,4	17,8	20,2	0,00177
14	7,3	69999,086	59,1	18,8	26,9	0,00261
15	6,4	69998,641	46,9	20,1	36,1	0,00388
16	5,5	69997,969	37,2	21,6	48,9	0,00580
17	4,5	69996,930	29,5	23,5	67,1	0,00877
18	3,6	69995,305	23,4	26,1	93,7	0,01341
19	2,7	69992,680	18,6	29,7	134,4	0,02091
20	1,8	69988,250	14,8	35,4	202,1	0,03357
21	0,8	69979,945	11,7	46,9	337,3	0,05729

Примечание. Распад МКТ завершен при $n = 21$ за время $\approx 14,5$ с (после входа в атмосферу). Скорость удаления МКТ от Земли за пределами атмосферы $V_{+\infty} = 69879,29$ м/с. Доля энергии МКТ, выделившейся в атмосфере, $\delta U \approx 0,34$ % (тротиловый эквивалент энерговыделения $\approx 1,22 \cdot 10^{10}$ т).

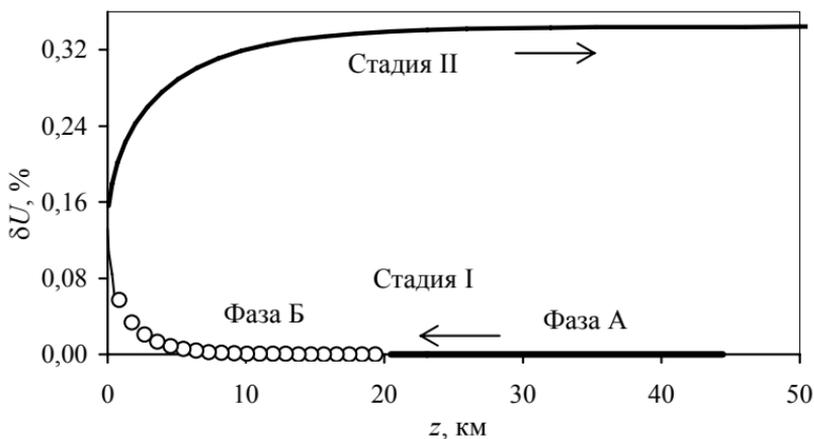


Рис. 4.6. Зависимость $\delta U(z)$ при взаимодействии МКТ типа Икар с атмосферой Земли. Стрелки показывают направление движения МКТ относительно $z_0 = 70$ км

Стадия I: фаза А – торможение МКТ на этапе сближения с планетой перед фрагментацией с относительно малым энерговыделением, фаза Б – фрагментация МКТ с заметным возрастанием энерговыделения (точки соответствуют актам фрагментации);

Стадия II: торможение МКТ после фрагментации с резким ростом энерговыделения вначале и постепенной стабилизацией его по мере удаления от планеты.

Очевидно, наиболее интенсивная «перекачка» части кинетической энергии МКТ в УВ происходит в результате АД торможения фрагментов на стадии II.

Основные результаты расчетов для ряда значений z_0 приведены в табл. 4.14, где, кроме известных обозначений, t_{fr} – время фрагментации (после «входа» в атмосферу), t_{er} – время энерговыделения в атмосфере. Оказалось, что минимальная высота пролета, при которой астероид не разрушается, составляет $z_0 = 90$ км, при этом $t_{er} \approx 30$ с. Следует отметить, что высота начала фрагментации

Распад МКТ типа Икар в атмосфере Земли (горная порода, $D_0 = 1500$ м, $\rho_b = 3500$ кг/м³,

$$K_{IC}^2 = 10^{12} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}, V_{-\infty} = 70 \text{ км/с}$$

z_0 , км	z_{entr} , км	n	z_1 , км	z_n , км	V_1 , м/с	V_n , м/с	$V_{+\infty}$, м/с	D_n , м	t_{fp} , с	δU_n , %	δU , %	δU , т ТНТ	t_{er} , с
90	77,71	0	—	—	—	—	69999,90	1500,0	—	—	2,68 · 10 ⁻⁴	9,60 · 10 ⁶	30,5
89	78,66	1	0,3	0,3	69999,961	69999,961	69999,88	1190,6	13,5	10 ⁻⁴	3,57 · 10 ⁻⁴	1,28 · 10 ⁷	29,6
87	80,57	3	2,3	0,5	69999,969	69999,945	69999,77	750,0	13,5	2 · 10 ⁻⁴	6,7 · 10 ⁻⁴	2,40 · 10 ⁷	30,3
85	82,48	5	4,3	0,6	69999,977	69999,906	69999,54	472,5	13,5	3 · 10 ⁻⁴	1,34 · 10 ⁻³	4,80 · 10 ⁷	30,9
80	87,27	11	9,3	0,1	69999,977	69999,110	69996,74	118,1	14,7	2,6 · 10 ⁻³	9,31 · 10 ⁻³	3,33 · 10 ⁸	32,2
70	96,88	21	19,3	0,8	69999,984	69979,945	69879,29	11,7	14,5	0,057	0,34	1,22 · 10 ¹⁰	34,9
60	106,52	32	29,3	0,4	69999,984	68908,914	64949,98	0,9	15,8	3,09	13,91	4,98 · 10 ¹¹	39,1
50	116,19	38	39,3	3,5	69999,984	63162,496	21355,07	0,2	14,6	18,6	90,69	3,25 · 10 ¹²	85,1
47	119,09	39	42,3	4,5	69999,984	59119,824	7520,24	0,2	14,5	28,67	98,85	3,54 · 10 ¹²	196,9
70 ¹⁾	96,88	31	28,5	0,8	69999,992	69791,086	68797,02	1,2	14,6	0,60	3,41	1,22 · 10 ¹¹	36,7
70 ²⁾	96,88	40	37,7	1,4	70000,000	68627,734	60631,29	0,1	14,1	3,88	24,98	8,94 · 10 ¹¹	40,4
70 ³⁾	95,02	17	15,5	0,7	54999,977	54999,316	54962,68	29,5	18,5	0,024	0,136	3,01 · 10 ⁹	44,3
70 ⁴⁾	92,57	12	10,4	0,2	39999,965	39998,008	39991,73	93,8	26,1	0,010	0,041	4,79 · 10 ⁸	58,0

¹⁾ Расчет при $K_{IC}^2 = 10^{11} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$ при прочих равных условиях. ²⁾ Расчет при $K_{IC}^2 = 10^{10} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$ при прочих равных условиях.

³⁾ Расчет при $V_{-\infty} = 55$ км/с при прочих равных условиях. ⁴⁾ Расчет при $V_{-\infty} = 40$ км/с при прочих равных условиях.

астероида $z_0 + z_1 = 89,3 \text{ км} = \text{const}$, независимо от z_0 . По мере уменьшения z_0 количество актов фрагментации n возрастает до максимума при $z_0 = 0$ (рис. 4.7), а высота ее окончания ($z_0 + z_n$) – уменьшается (однако во всех случаях фрагментация оканчивается вблизи z_0). Одновременно растут значения δU_n , δU и t_{er} , причем $\delta U > \delta U_n$. Расчеты по формулам (2.46) и (2.49) показали, что во всех рассмотренных случаях при сближении астероида с планетой и удалении от нее $\delta U'(z)$, соответственно, растет и убывает практически линейно, достигая максимума при $(z_{\max})_n \approx 0$.

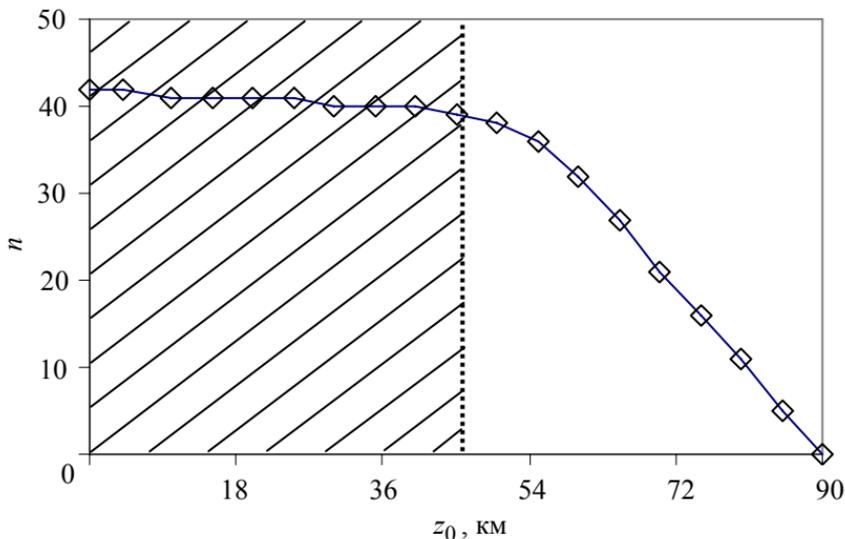


Рис. 4.7. Зависимость числа актов фрагментации МКТ от z_0 . Штриховкой обозначена область «захвата» фрагментов МКТ Земли, \diamond – расчетное значение $n(z_0)$

Рассматривая влияние прочности материала астероида (в данной модели – K_{IC}^2) или начальной скорости ($V_{-\infty}$) на параметры

его взаимодействия с атмосферой, примем, для определенности, например, $z_0 = 70$ км при прочих равных условиях (см. строки 10–12 в табл. 4.14). Априори ясно, что при меньшей прочности разрушение МКТ должно начаться при меньшей АД нагрузке. Это возможно в менее плотных слоях атмосферы, т. е. на высоте $z_0 > 70$ км. При меньшей начальной скорости АД нагрузка снижается, поэтому разрушение МКТ должно начаться в более плотных слоях атмосферы, т. е. на высоте $z_0 < 70$ км.

По расчетам, уменьшение K_{IC}^2 на 1 и 2 порядка, действительно, привело к увеличению высоты начала фрагментации, но всего на ≈ 10 и ≈ 20 %, причем высота ее окончания практически не изменилась. Это говорит о слабом влиянии прочности на данные параметры. Вместе с тем, резко возросла интенсивность фрагментации, так как количество актов разрушения увеличилось в $\approx 1,5$ и ≈ 2 раза, а время практически не изменилось. Резко, на 1 и 2 порядка, повысилось энерговыделение как при фрагментации, так и во все время взаимодействия с атмосферой.

Уменьшение V_{∞} на ≈ 20 % и ≈ 40 % привело к снижению высоты начала фрагментации всего на ≈ 4 % и ≈ 10 %, соответственно, а высота ее окончания практически не изменилась. Следовательно, и этот фактор (как и прочность) относительно слабо влияет на данные параметры. Сильнее он влияет на интенсивность фрагментации: она резко понизилась, так как количество актов уменьшилось на ≈ 24 % и 75 %, а время возросло на ≈ 28 % и ≈ 80 %. Существенно уменьшилось энерговыделение: в $\approx 2,4$ и $\approx 5,7$ раз при фрагментации и в $\approx 2,5$ и ≈ 8 раз во все время взаимодействия с атмосферой.

При $z_0 < 50$ км МКТ передает практически всю кинетическую энергию атмосфере за время $t_{er} \geq 85$ с. Эта энергия в $\approx 4 \cdot 10^5$ раз превышает энерговыделение при отсутствии фрагментации (сравни с 1-й строкой табл. 4.14). Однако и при отсутствии фрагментации энерговыделение чрезвычайно велико, так как эквивалентно энергии взрыва ≈ 500 бомб Хиросимы, т. е. 10-мегатонной бомбы. Воз-

можно ли представить себе масштабы бедствия для обитателей Земли от подобного «рандеву» с МКТ типа Икара, если оно состоится над каким-нибудь густонаселенным регионом?!

Напомним, что в нашей модели не учитывается действие гравитационного поля Земли. Если принять во внимание и этот фактор, то следует ожидать, что при $z_0 < 50$ км окончательные размеры фрагментов в процессе торможения могут оказаться заметно меньше расчетных, и эти фрагменты будут захвачены Землей. Так, по нашим оценкам, при $z_0 = 47$ км (и менее) расчетная скорость выхода фрагментов из атмосферы составляет всего 7,5 км/с (и менее), и они должны будут выпасть на Землю, по-видимому, как тектиты. Это предположение обусловлено как большим числом образовавшихся фрагментов, так и их малыми размерами. Так, при $n \approx 30$ число фрагментов составит более 10^9 , а при $n \approx 40$ – более 10^{12} . Интенсификация процессов абляции естественно приведет к дальнейшему уменьшению их размеров и оплавлению.

4.2.2. Распад кометы Шумейкерв–Леви 9 в атмосфере Юпитера

В 1994 г. мировая общественность была взбудоражена уникальным спектаклем, разыгравшимся в космосе: атакой планеты-гиганта Юпитера фрагментами кометы Шумейкерв–Леви 9 (SL9). В течение недели (16–22 июля 1994 г.) они бомбили планету, распадаясь в верхних слоях ее атмосферы (рис. 4.8 на цветной вкладке). Для Юпитера эти удары были, как говорится, что слону дробинки, а вот для Земли их последствия, несомненно, были бы подлинной катастрофой, так как кинетическая энергия кометы оценивается энергией взрыва от $\square 4 \cdot 10^{11}$ до $\square 2 \cdot 10^{15}$ т ТНТ (т. е. от $\square 2 \cdot 10^7$ до $\square 10^{11}$ бомб Хиросимы).

Особый интерес вызвало то, что перед этой атакой SL9 по каким-то причинам распалась на ~ 20 – 25 частей. В [31] приведена фотография этих фрагментов, цепочкой приближающихся к Юпитеру. Подобные явления распада комет или метеороидов при их прохождении через атмосферу Земли многократно наблюдались и ранее [32]. По-видимому, примером такого события является распад

кометы Биелы, «разделившейся на две части на глазах у наблюдателей в 1845 г. и давшей начало метеорному потоку» [33, с. 69].

По данным Мэлоша и Шенка (Melosh H.J., Shenk P.), приведенным в [34], обнаруженные станцией «Вояджер-1» в январе 1979 г. многочисленные цепочки кратеров на спутниках Юпитера Каллисто и Ганимеде образовались вследствие падения фрагментов ранее распавшихся комет. В [35] был рассмотрен возможный механизм образования цепочки фрагментов малого (относительно толщины атмосферы) космического тела (МКТ) под влиянием гравитации. При этом, как показали численные расчеты одной из моделей, если представить ядро SL9 в виде груды малоплотных камней, связанных только гравитационными силами, то при сближении с Юпитером оно распадется. Затем, под действием гравитации, фрагменты ядра объединятся в более крупные образования. В процессе расчетов удалось воспроизвести цепочку фрагментов SL9, если «родительское» тело имело диаметр 1,5 км при плотности $0,5 \text{ г/см}^3$, а число камней составляло несколько тысяч.

Попытка описания процесса распада SL9 действием АДС была сделана нами в [17]. Оценки показали, что, в зависимости от материала кометы, для ее распада на ≈ 20 частей она должна была пройти в 1992 г. через верхние слои атмосферы Юпитера на высоте $\approx 450\text{--}650$ км (за нулевой уровень отсчета была принята высота, где начинается конденсация атмосферных газов [36]). Независимо такая возможность фрагментации была высказана в [37], однако, как показано в [38]*, для ее адекватного описания необходимо перейти к энергетической концепции современной механики разрушения.

Кометой это МКТ называют по традиции, хотя, как следует из [31], определенно сказать, что это, комета или астероид, не представляется возможным. Это дает право проводить расчеты не только для льда, но и для других плотных и прочных материалов. Как известно [31, 39], перед падением на Юпитер SL9 распалась на 20–25 частей. Предполагая, что распад SL9 произошел

*Летом 1996 г. материал представлен в докладе А. Г. Иванова «Об адекватности описания процесса разрушения в расчетах на ЭВМ» на международной конференции «Параллельные вычисления и математическое моделирование», проходившей в Сарове.

в атмосфере Юпитера за один пролет мимо него при предыдущей встрече, т. е. примерно за 2 года (точнее 104 недели) до падения на Юпитер, оценим на основе разработанной модели высоту пролета этого МКТ z_0 , при которой возможна такая фрагментация. Ранее в [17] такие оценки были сделаны нами для SL9 из ряда материалов при кинетической энергии $U_0 = 4,2 \cdot 10^{23}$ Дж и $V_{-\infty} = 60$ км/с (табл. 4.15).

При проведении расчетов примем во внимание, что, по последним данным, число фрагментов SL9, выпавших на Юпитер, составляло 25 [39]. Если бы фрагментация происходила за 4 или 5 актов, то по нашей схеме образовалось бы 16 или 32 фрагмента. Поскольку фрагментов было 25, примем для расчетов, что распад произошел за 4 акта. В этом случае 25 фрагментов получатся, если, например, при первом акте образовалось не 2, а 3 части, и так же на 3 части распался один из фрагментов при последнем акте. Размеры фрагментов, приведенные в [39], позволяют оценить общий исходный объем SL9 и $D_0 \approx 7,5$ км (в сферическом приближении). Скорость по-прежнему примем $V_{-\infty} = 60$ км/с. Таким образом, использование D_0 в основе расчетов отличает их постановку от [17], где вместо этого была использована U_0 .

Основные исходные данные и результаты предварительных расчетов приведены в табл. 4.15 для тел изо льда и гранита при $D_0 \approx 7,5$ км. Согласно [39], SL9 не могла относиться к никель-железным (железным) телам. Однако для более полной иллюстрации влияния плотности МКТ на результаты расчетов в данной таблице приведены результаты расчетов и для гипотетического МКТ с этим же диаметром и плотностью материала 7800 кг/м^3 , соответствующей железу. В каждом случае исследовалось влияние и прочности (трещиностойкости) тела на его фрагментацию путем увеличения K_{IC}^2 на 2 порядка против номинала. Средний радиус Юпитера был принят равным $R_{\text{П}} = 68836$ км, плотность атмосферы рассчитывали по формуле (2.26) при $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ и $H = 21,86$ км. По последним

данным [40], представляющимся авторам более достоверными, диаметр родительского тела SL9 (лед) составлял $D_0 \approx 2$ км при той же скорости. Если принять данное МКТ с этой же массой, но в форме параллелепипеда, то его базовый размер составил бы $L_0 \approx 1,6$ км. Результаты предварительных расчетов по этим данным также включены в таблицу (лед, 3-я и 4-я строки), где, очевидно, весьма близки.

Из табл. 4.15 следует, что, во-первых, АД нагружение тел можно считать близким к квазистатическому ($\tau_k > 1$) и, во-вторых, увеличение плотности и прочности тела, при прочих равных условиях, приводит к существенному (в 1,5–2 раза) снижению z_0 . Это и понятно, если учесть, что для разрушения более плотных и прочных тел требуется увеличение АД нагрузки, а это возможно в более плотных слоях атмосферы, т. е. как раз при меньших z_0 .

Как известно, кометные ядра состоят в основном из льда, поэтому в табл. 4.16 приведены результаты численных расчетов фрагментации и рассеяния ледяных тел, указанных в 1, 3 и 4-й строках табл. 4.15 (т. е. при номинальных значениях K_{IC}^2). Так как расчеты показали, что в процессе фрагментации скорость МКТ и его фрагментов практически не меняется, расчеты рассеяния проводились с использованием разностной схемы на основе $\delta\xi_s = l_k$.

Полученные результаты показывают, что при «транзите», в отличие от «косого» падения, на стадии сближения с планетой распад тел обеих геометрий протекает чрезвычайно вяло, с ничтожными угловыми и поперечными скоростями. С помощью (3.82) и (3.83) это можно объяснить сильным влиянием относительно крупных размеров фрагментов ($r_k \square 10^3$ м), а также весьма малых значений $\exp(-z_0/2H)$ ($\square 10^{-4}$). Поэтому между актами фрагментации критические значения параметров ϕ_k и $\dot{\phi}_k$ не достигаются и процессы не описываются аналитическими формулами (3.77)–(3.80).

Таблица 4.15

Исходные данные и результаты оценок z_0 для кометы Шумейкеров – Леви 9 $(V_{-\infty} = 60 \text{ км/с}, R_{\text{П}} = 68836 \text{ км})$

Материал МКТ	ρ_b , кг/м ³	C_b , км/с	K_{IC}^2 , Па ² ·м	D_0 , км	U_0 , Дж	τ_k	z_0 , км
Лед	900	2,0	$1,6 \cdot 10^{17*}$	7,5	$3,58 \cdot 10^{23}$	$1,2 \leq \tau_k \leq 3,6$	$367,0 \pm 1,0$
			$1,6 \cdot 10^9$	7,5	$3,58 \cdot 10^{23}$	$1,1 \leq \tau_k \leq 6,3$	$316,5 \pm 0,5$
			$1,6 \cdot 10^{17*}$	2,0**	$6,79 \cdot 10^{21}$	$4,5 \leq \tau_k \leq 12,9$	$352,5 \pm 0,5$
Гранит	2700	5,4	$1,6 \cdot 10^{17*}$	$L_0 = 1,6^{***}$	$6,79 \cdot 10^{21}$	$5,8 \leq \tau_k \leq 16,9$	$357,0 \pm 1,0$
			$9 \cdot 10^{11*}$	7,5	$10,74 \cdot 10^{23}$	$3,2 \leq \tau_k \leq 8,8$	$247,0 \pm 1,0$
			$9 \cdot 10^{13}$	7,5	$10,74 \cdot 10^{23}$	$3,3 \leq \tau_k \leq 9,5$	$197,0 \pm 1,0$
Железо	7800	5,9	10^{15*}	7,5	$31,01 \cdot 10^{23}$	$3,5 \leq \tau_k \leq 9,9$	$170,5 \pm 0,5$
			10^{17}	7,5	$31,01 \cdot 10^{23}$	$3,5 \leq \tau_k \leq 9,6$	$120,0 \pm 1,0$

*Номинальное значение.

**Диаметр МКТ принят в соответствии с [40].

***Базовый размер прямоугольного МКТ с той же массой, что и у предыдущего сферического МКТ (с $D_0 = 2 \text{ км}$).

Таблица 4.16

Варианты распада кометы Шумейкеров–Леви 9 (лед, $\rho_b = 900 \text{ кг/м}^3$, $K_{IC}^2 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$,
 $V_{-\infty} = 60 \text{ км/с}$, $R_{II} = 68836 \text{ км}$)

k	$z_k, \text{ км}$	$V_k, \text{ м/с}$	$D_k, \text{ м}$	$\delta U_k, \%$	$l_k, \text{ км}$	$t_k, \text{ с}$	τ_k	$\varphi_k, \text{ рад}$	$\dot{\varphi}_k, 1/\text{с}$	$V_{\text{плк}}, \text{ м/с}$	$R_k, \text{ км}$
Сфера, $D_0 = 7,5 \text{ км}$, $z_0 = 367 \text{ км}$											
1	7,6	≈ 60000	5952,754	≈ 0	–	–	–	–	–	–	–
Поворот 1		≈ 60000		≈ 0	173,607	2,893	–	$6,63 \cdot 10^{-9}$	$1,58 \cdot 10^{-9}$	$5,94 \cdot 10^{-6}$	–
2	5,1	≈ 60000	4724,704	≈ 0	–	–	1,22	–	–	–	1,406
Поворот 2		≈ 60000		≈ 0	215,350	3,589	–	$1,82 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-9}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	–
3	2,6	≈ 60000	3750,000	≈ 0	–	–	1,92	–	–	–	2,522
Поворот 3		≈ 60000		≈ 0	321,451	5,358	–	$7,22 \cdot 10^{-8}$	$5,03 \cdot 10^{-9}$	$1,57 \cdot 10^{-5}$	–
4	0,06	≈ 60000	2976,377	≈ 0	–	–	3,61	–	–	–	3,408
Поворот 4		≈ 60000		≈ 0	382,846	6,381	–	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$8,38 \cdot 10^{-9}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	–
Фрагментация кометы завершена											
При прохождении z_0 :		≈ 60000	2976,377	≈ 0	1093,254	18,221	–	$1,71 \cdot 10^{-7}$	$8,38 \cdot 10^{-9}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	4,111

Продолжение табл. 4.16

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	τ_k	φ_k , рад	$\dot{\varphi}_k$, 1/с	$V_{\text{пл}k}$, м/с	R_k , км
Сфера, $D_0 = 2$ км, $z_0 = 352,5$ км											
1	8,8	≈ 60000	1587,401	≈ 0	—	—	—	—	—	—	—
Поворот 1		≈ 60000		≈ 0	172,911	2,882	—	$1,79 \cdot 10^{-7}$	$4,32 \cdot 10^{-8}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	
2	6,3	≈ 60000	1259,921	≈ 0	—	—	4,58	—	—	—	0,375
Поворот 2		≈ 60000		≈ 0	214,133	3,569	—	$4,90 \cdot 10^{-7}$	$7,69 \cdot 10^{-8}$	$7,47 \cdot 10^{-5}$	
3	3,8	≈ 60000	1000,000	≈ 0	—	—	7,12	—	—	—	0,673
Поворот 3		≈ 60000		≈ 0	317,103	5,285	—	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$1,37 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	
4	1,3	≈ 60000	793,701	≈ 0	—	—	13,33	—	—	—	0,909
Поворот 4		≈ 60000		≈ 0	392,413	6,540	—	$5,14 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$	$1,70 \cdot 10^{-4}$	
Фрагментация кометы завершена											
При прохождении z_0 :		≈ 60000	793,701	≈ 0	1096,560	18,276	—	$5,14 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-7}$	$1,70 \cdot 10^{-4}$	1,096
Параллелепипед, $L_0 = 1,6$ км, $z_0 = 357$ км											
1	8,8	≈ 60000	1269,921	≈ 0	—	—	—	—	—	—	—
Поворот 1		≈ 60000		≈ 0	172,899	2,882	—	$4,86 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	
2	6,3	≈ 60000	1007,937	≈ 0	—	—	5,8	—	—	—	0,285

Окончание табл. 4.16

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	τ_k	φ_k , град	$\dot{\varphi}_k$, 1/с	$V_{\text{пл}k}$, м/с	R_k , км	
Поворот 2		≈ 60000		≈ 0	213,596	3,560	—	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$2,09 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$		
3	3,8	≈ 60000	800	≈ 0			9,0				0,511	
Поворот 3		≈ 60000		≈ 0	315,688	5,261	—	$5,15 \cdot 10^{-6}$	$3,72 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$		
4	1,2	≈ 60000	634,96	≈ 0			16,5				0,690	
Поворот 4		≈ 60000		≈ 0	395,515	6,592	—	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$6,22 \cdot 10^{-7}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$		
Фрагментация кометы завершена												
При прохождении z_0 :		≈ 60000	634,96	5,72	408,393	7,010	—	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$6,22 \cdot 10^{-7}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	1,473	
Слущая период обращения МКТ вокруг Юпитера (104 недели):												
							$D_0 = 7,5$ км	Диаметр поля рассеяния, км:				11,019
							$D_0 = 2,0$ км	% поля рассеяния от диска Юпитера:				$6,4 \cdot 10^{-7}$
							$L_0 = 1,6$ км	Диаметр поля рассеяния, км:				23,6
								% поля рассеяния от диска Юпитера:				$2,9 \cdot 10^{-6}$
								Диаметр поля рассеяния, км:				43,6
								% поля рассеяния от диска Юпитера:				10^{-5}

Таким образом, фрагменты не успевают «расстаться» друг с другом и движутся во взаимном контакте вплоть до окончания фрагментации. При заданном количестве актов ($n = 4$) значения параметров фрагментации, таких, как z_0, z_k, V_k, l_k и t_k , у тел с близкими размерами ($D_0 = 2$ км и $L_0 = 1,6$ км), но разной геометрией весьма близки. Также и на стадии рассеяния сферических и прямоугольных фрагментов видно, что влияние их АД качества сказывается несущественно – это заметно по близости соответствующих параметров $\phi_k, \dot{\phi}_k, V_{\eta k}$ и R_k . Зато размеры тел влияют существенно, в полном соответствии с (3.82) и (3.83): при $D_0 = 7,5$ км $\phi_k, \dot{\phi}_k$, и $V_{\eta k}$ меньше на 1–2 порядка, а диаметр поля рассеяния более чем в 3 раза меньше таковых при $D_0 = 2$ км. Однако в любом из рассмотренных случаев поля рассеяния фрагментов проецируются на диск Юпитера практически в точку, так как составляют от его площади порядка от 10^{-7} до 10^{-5} %.

Нетрудно оценить, что в момент последнего «свидания» с Юпитером диаметр раздробленного ядра ($2R_k$) сферической кометы с $D_0 = 2$ км увеличился в ≈ 12 раз, а прямоугольной – в ≈ 27 раз. Это объясняется лучшим АД качеством сферы и ее фрагментов, обусловившим их сравнительно меньший разлет. Теперь становится понятным, что на этапе удаления от планеты в пределах атмосферы реальные фрагменты даже одного родительского тела отличаются размерами (одни – крупнее, другие – помельче), геометрией (сфероидные, угловатые) и, следовательно, АД качеством (одни будут опережать, а другие – отставать). В результате, при ничтожных скоростях разлета они вполне могут растянуться «в ничточку» на траектории и покинуть атмосферу с различными скоростями, вследствие чего на следующем витке орбиты они вернуться к планете «цугом», более или менее дистанцированными друг от друга. Во всяком случае, результаты расчетов не противоречат этому выводу, так как расчетные диаметр и площадь поля рассеяния мизерны по сравнению с таковыми параметрами диска Юпитера.

С этой точки зрения, данные модели фрагментации и рассеяния кометы SL9 позволили вполне удовлетворительно, если не сказать очень хорошо, описать процесс ее распада накануне уникального астрономического явления в июле 1994 г.

В какой мере предложенная модель фрагментации способна описать реальные события? Выше мы обосновали возможное количество актов фрагментации $n = 4$. В этом случае отклонения от модели (образование на отдельных этапах не 2 а 3 фрагментов) легко объясняются неоднородностью МКТ, которая, несомненно, имела место. По данным [31,39] видно, что перед падением на Юпитер фрагменты SL9 располагались на орбите цугом длиной несколько млн. км, поэтому их внедрение в атмосферу Юпитера продолжалось в течение недели. Следовательно, после распада SL9 скорости ее фрагментов были различны: если распад произошел при предыдущем сближении с Юпитером (июль 1992 г.), то за истекшие 2 года различие скоростей относительно центра масс SL9 составило всего $\pm 0,5\%$. Это различие объясняется различием форм и размеров фрагментов (вследствие вышеупомянутой неоднородности родительского тела) и, как следствие, их различным АД качеством.

Для реализации АД механизма фрагментации необходимо предположить, что в 1992 г. SL9 прошла через верхние слои атмосферы Юпитера, т. е. на расстоянии $\approx 7 \cdot 10^4$ км от его центра. Если такое событие исключить нельзя, то предложенный механизм физически вполне оправдан и предпочтителен по сравнению с механизмом фрагментации под действием приливных сил. Какова же имеющаяся информация по этому вопросу?

Согласно неопубликованным данным P. W. Chodas и D. K. Yeomans в [35], SL9 была захвачена Юпитером и прошла на расстоянии $\approx 9,4 \cdot 10^4$ км от его центра. По данным [31] это расстояние составляло $\approx 10^5$ км, а в [41] оно оценивается уже как $\approx 1,15 \cdot 10^5$ км и, со ссылкой на работу J. M. Hahn и T. W. Rettig, считается, что родительское тело «было захвачено Юпитером несколько десятилетий назад, однако определить его происхождение и более раннюю орбиту, по-видимому, невозможно из-за хаотично-

сти его орбиты». В [39] отмечается, что общепризнанной причиной распада SL9 были градиенты приливных сил при прохождении зоны Роша Юпитера, а в [31] эти силы характеризуются даже как гигантские. Покажем, что это не так.

Приливно́ная сила есть градиент гравитационной силы, которая, в свою очередь, зависит от ускорения силы тяжести (при прочих равных условиях). Фактически ускорение силы тяжести на поверхности Юпитера всего в 2,3 раза больше земного, а на расстоянии в 1,3–1,6 радиуса Юпитера, где предположительно произошел распад родительского тела, они практически одинаковы. Что же касается их градиентов, то у поверхности Земли они на порядок выше, чем на расстоянии 1,3–1,6 радиуса Юпитера. Таким образом, приливные силы в зоне Роша Юпитера отнюдь не гигантские, а даже на порядок меньше, чем у Земли.

Конечно, вероятность прохождения SL9 через атмосферу Юпитера на несколько порядков меньше, чем через зону Роша, вследствие существенной разницы между их размерами. Но это не означает, что столь же мала и вероятность фрагментации SL9 под действием АД сил, и вот почему. Если SL9 представляет собой «ком» из слабо скрепленных ледяных частей, то его фрагментация приливно́ными силами возможна только на начальном этапе и при размере родительского тела ~ 10 км [39]. Но в [35] показано, что гомогенное хрупкое тело с очень низкой, но конечной прочностью не может быть разделено приливно́ными силами на наблюдаемое число фрагментов, если не принять его прочность неразумно малой. Там же путем компьютерного моделирования показано, что для узкой области объемных плотностей $0,3\text{--}0,7$ г/см³ удастся воспроизвести фрагментацию, похожую на фрагментацию SL9. При этом цепочка из ≈ 20 фрагментов образуется после выполнения нескольких условий:

- 1) родительское тело состоит из нескольких тысяч сферических плотноупакованных гранул,
- 2) между гранулами отсутствуют прочностные связи и трение,
- 3) родительское тело не вращается,
- 4) его объемная плотность $\approx 0,5$ г/см³, диаметр 1,5 км.

Далее, если фрагментация под действием приливных сил ранее никогда не наблюдалась [31], то именно действием АД сил можно объяснить происхождение тектитов и ряд других небесных явлений при взаимодействии МКТ с атмосферами планет. Так, в [42, с. 100], со ссылкой на канадского астронома Ханта, дается величественная картина прохождения в верхних слоях атмосферы над североамериканским материком цепочки Кириллид (рис. 2.1), состоявшей из 3 групп фрагментов: первая и вторая (справа налево) содержали по 3 фрагмента, а третья – 4. Здесь дискретный характер фрагментации очевиден. Другим фактом является, в частности, многократность фрагментации Сихотэ-Алинского метеороида (см. п. 4.1.1), рассчитанная в [4] и подтвержденная результатами морфологических исследований фрагментов. Новым, что, по мнению авторов, делает АД модель фрагментации более универсальной, является учет квазистатического характера нагружения МКТ и использование ИП современной МХР. Было бы полезным использование его и при описании подобных явлений в [34, 41], а также процесса формирования колец типа колец Сатурна. Заметим, что использование приливного механизма фрагментации МКТ при описании процесса образования колец Сатурна, в частности, тех из них, которые содержат обломки горных пород, не смогло бы справиться с этой задачей.

В заключение заметим, что используемое нами (как и в [4, 17]) положение о квазистатическом характере нагружения МКТ и его фрагментов требует выполнения условия $\tau_k \gg 1$. При больших D_0 и $V_{-\infty}$ на первых этапах фрагментации, как оказалось в рассмотренных примерах, это условие строго не выполнялось (табл. 4.13). Означает ли это, что нагружение указанных объектов на этих этапах не было квазистатическим? Формально – да, но следует ожидать, что учет гравитации в целях приближения к действительности (а это усложнило бы задачу) привел бы к искривлению траектории МКТ, соответствующему уменьшению на ней градиентов плотности атмосферы и, как следствие, к увеличению длительности нагружения и выполнению вышеуказанного условия.

Литература

1. Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. – М.: Изд-во АН СССР, 1959-1963. Т. 1, 2.
2. Кринов Е. Л. Железный дождь. – М.: Наука, 1981.
3. Немчинов И. В., Попова О. П. Анализ Сихотэ-Алинского события 1947 г. и его сравнение с явлением 1 февраля 1994 г. // Астроном. вестник. 1997. Т. 31, № 5. С. 458–471.
4. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Анализ процесса дробления Сихотэ-Алинского метеорита с позиций механики разрушения // Там же. 1998. Т. 32, № 2. С. 164–168.
5. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Влияние формы малого космического тела на процесс его фрагментации в атмосфере планеты // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 3. С. 120–125.
6. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Модель рассеяния фрагментов малого космического тела в атмосфере планеты // Доклады АН. 2004. Т. 398, № 6. С. 759–763.
7. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Модель распада и рассеяния фрагментов малого космического тела в атмосфере планеты // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 121–132.
8. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974.
9. Passey Q. R., Melosh H. J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus. 1980. Vol. 42, N 2. P. 211–233.
10. Зоткин И. Т., Цыкулин М. А. Моделирование взрыва Тунгусского метеорита // Доклады АН СССР. 1966. Т. 167, № 1. С. 59-62.
11. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О зоне наземных разрушений при воздушном взрыве крупного метеорита // Известия АН СССР. МЖГ. 1974, №3. С. 94-100.
12. Петров Г. И., Стулов В. П. Движение больших тел в атмосферах планет// Космические исследования. 1975. Т. 13, № 4. С. 587–593.
13. Григорян С. С. К вопросу о природе Тунгусского метеорита // Доклады АН СССР. 1976. Т. 231, №1. С. 57–60.

14. Войцеховский Б. В. К проблеме Тунгусского метеорита // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 5-8.

15. Васильев Н. В. Парадоксы проблемы Тунгусского метеорита // Известия высших учебных заведений (Изд-во Томского университета). 1992, № 3. С. 111–117.

16. Огненный шар над Сибирью. Невероятные версии. Оптические фейерверки // Неразгаданные тайны человечества. Антология загадочных явлений. – Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2004. С. 338–339.

17. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Возможная природа взрыва Тунгусского метеорита и распада кометы Шумейкеров–Леви // Физика горения и взрыва. 1995*. Т. 31, № 6. С. 117–124 (поправка: Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 143).

18. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Фрагментация малого космического тела при его взаимодействии с атмосферой планеты // Доклады АН СССР. 1997. Т. 353, № 3. С. 334-337.

19. Уикс У. Ф., Ассур А. Разрушение морского и озерного льда // Разрушение. Т. 7. Ч. 1. – М.: Мир. 1976. С. 513–623.

20. Иванов Б. А. Успехи механики кратерообразования // Механика. Новое в зарубежной науке. Серия 26 «Удар, взрыв и разрушение». – М.: Мир, 1981. С. 231.

21. Загадка динозавров // Все тайны мира. – М.: Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2001. С. 262–264.

22. Метеоритная атака // 1000 чудес природы. – М.: Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2002. С. 364–365.

23. Гибель динозавров // Как это было на самом деле? – М.: Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2003. С. 22–24.

24. Космический удар по эволюции // Удивительная планета Земля. – Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2003. С. 190, 191.

25. Внезапная гибель динозавров // Неразгаданные тайны человечества. Антология загадочных явлений. – Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2004. С. 338.

*Работа была ранее представлена на Международной конференции SPE-94. Снежинск, 26–30 сентября 1994 г.

26. Снежный покров // Большая Советская Энциклопедия. Изд. 3-е. – М.: Советская Энциклопедия, 1976. Т. 23. С. 633–634.
27. Аризонский кратер: удар с небес // Планета чудес и загадок. Издательский Дом Ридерз Дайджест. 1997. С. 54–56.
28. Метеоритный кратер // Энциклопедия чудес природы. – Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2000. С. 338–339.
29. Метеоры и метеориты // Атлас вселенной для детей. – Издательский Дом Ридерз Дайджест. 2001. С. 46.
30. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Фрагментация малого космического тела в атмосфере планеты при пролете мимо нее // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 5. С. 127–137.
31. Chapmen Clarc R. Comet on target for Jupiter // Nature. 1993. Vol. 363. P. 492–493.
32. Медведев Ю. Д., Свешников М. Л., Сокольский А. Г. и др. Астероидно-кометная опасность / Под ред. А.Г. Сокольского. – СПб: ИТА РАН, 1996. 244 с.
33. Куликовский П. Г. Справочник астронома-любителя. – М: ГНТТЛ. 1953. С. 432.
34. Сокольский А. Г., Медведев Ю. Д., Козлов Е. А. Комета Хейла-Боппа: очень крупная комета или плотный рой осколков? // ДАН. 1996. Т. 350, № 1. С. 42–44.
35. Asphang E., Benz W. Density of comet Shoemaker-Levy 9 deduced by modeling break up of the parent «rubble pile» // Nature. 1994. Vol. 370. P. 120–123.
36. Коробейников В. П., Власов В. И., Волков Д. Б. Моделирование разрушения космических тел при движении в атмосферах планет // Мат. моделирование. 1994. Т. 6, № 8. С. 61–75.
37. Григорян С. С. О столкновении кометы Шумейкеров–Леви 9 с Юпитером в июле 1994 г. // ДАН. 1994. Т. 338, № 6. С. 752–754.
38. Иванов А. Г. Об адекватности описания процесса разрушения в расчетах на ЭВМ // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40, № 3. С. 191–195).
39. Фортгов В. Е., Гнедин Ю. Н., Иванов М. Ф. и др. Столкновение кометы Шумейкеров–Леви 9: что мы увидели // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 4. С. 391–422.

40. Немчинов И. В., Попова О. П., Тетерев А. В. Внедрение крупных метеоритов в атмосферы // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72, № 6. С. 1233–1265.

41. Григорян С. С., Ибодов Ф. С., Ибадов С. Об эволюции комет вблизи Солнца. Кометы семейства Крейца // Доклады АН. 1997. Т. 354, № 2. С. 187–189.

42. Воробьев Г. Г. Что вы знаете о тектитах? – М.: Наука. 1966.