

ГЛАВА 4. ПРИМЕРЫ ПРИЛОЖЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РАСПАДА МКТ К ИЗВЕСТНЫМ ПРИРОДНЫМ ЯВЛЕНИЯМ

4.1. Распад МКТ при «косом» падении на планету

4.1.1. Сихотэ-Алинский «железный дождь»

12 февраля 1947 г. над Приморьем пронесся яркий болид, взорвавшийся на высоте от 5 до 10 км над Сихотэ-Алинским хребтом. Фрагменты метеороида дождем осыпались в тайгу. Спустя два месяца специальная экспедиция Комитета по метеоритам АН СССР провела опрос многочисленных очевидцев. По их свидетельствам, болид появился как яркая звезда, быстро увеличивавшаяся в размерах. Иногда возникали вспышки света. Некоторые утверждали, что наблюдали дробление болида и полет отдельных фрагментов. Многими в устных рассказах и зарисовках отмечалось расширение следа по мере снижения метеороида, заметное с различных расстояний от места падения (от 20 до 105 км). Вероятно, утолщение следа было связано с разрушением метеороида, при котором за общей УВ двигался расширявшийся рой крупных фрагментов и облако мелких фрагментов и паров. Наблюдались также небольшие спутники вокруг основного болида, заметные даже издали (в радиусе от 20 до 54 км). Вероятно, фрагментация метеороида была прогрессирующим процессом, так как в устных свидетельствах отмечалось несколько актов разрушения.

В нижней части траектории метеороид состоял из нескольких фрагментов, каждый из которых сопровождался дымным следом. По словам одних очевидцев (находившихся в 47 км), «неожиданно показался огонь, как горящие свечи (четыре)», по свидетельствам других – «казалось, будто из чего-то поливают» (43 км) и «приближавшийся к земле огненный шар раздробился на четыре части» (29 км), «огонь был очень яркий, по форме напоминал метлу» (70 км). По яркости этот огонь сравнивали с Солнцем или даже ярче, так как он создавал дополнительные тени.

На месте падения фрагментов образовалось обширное кратерное поле, на котором трудами 15 экспедиций АН СССР [1, 2] было обнаружено 24 кратера диаметром от 9 до 26 м и около 200 воронок и лунок меньших размеров. Многие фрагменты сильно разрушились от удара о скальный грунт, и в тайге рассеялись их многочисленные мелкие фрагменты (к середине 70-х гг. их было собрано свыше 3500), массой от долей граммов до нескольких килограммов. Из найденных целых фрагментов наиболее крупные весят 1750, 1000, 700, 500, 450 и 350 кг. Общая масса собранного метеоритного вещества составила около 27 т. Его химсостав, %: Fe 93,29; Ni 5,94; Co 0,39; Cu 0,03; P 0,56; S 0,28, другие элементы содержатся в ничтожно малых количествах (т. е., по существу, это железоникелевый сплав). По оценкам, полная масса метеороида составляла от 70 до 100 т, а скорость его движения в атмосфере ≈ 20 км/с, но позднейший анализ [3] показал, что более вероятными являются 300 т и 12 км/с.

По свидетельствам очевидцев, высота разрушения метеороида колебалась от 4 до 168 км, наиболее вероятными из которых признаны 6, 16, 34 и 58 км, однако, по мнению авторов работы [3], к этим значениям следует относиться очень осторожно. Средняя высота для всех наблюдений составляет около 35 км. Представляется весьма вероятным, что дробление метеороида проходило, по крайней мере, в два этапа. Позднее, по данным работ вышеупомянутых экспедиций АН СССР, было официально сообщено: «Изучение морфологических характеристик позволило надежным способом установить, что метеоритный дождь образовался в результате раздробления (и притом многократного) первоначально единого метеорного тела во время движения его с космической скоростью в земной атмосфере. В результате изучения морфологических характеристик индивидуальных экземпляров были выделены *три* главные стадии дробления, протекавшего при *трех* разных скоростях движения...» [1] (курсив наш. – А.И. и В.Р.).

Ниже приводятся результаты моделирования фрагментации и рассеяния данного метеороида, опубликованные авторами в [4–7].

4.1.1.1. Фрагментация Сихотэ-Алинского метеороида.

Вначале, следуя [3], в [4] было принято МКТ в форме шара с массой $M_0 = 10^5$ кг, из гомогенного изотропного вещества с плотностью (железо) $\rho_b = 7800$ кг/м³, внедряющееся в атмосферу при $\alpha = 40^\circ$ и $V_0 = 20000$ м/с. Соответственно, для метеороида $D_0 \approx 3$ м, $C_\xi = 1$, статическое и динамическое значения K_{IC}^2 равны 10^{15} Па²·м [8] и 10^{17} Па²·м, объемная скорость звука $C_b = 5900$ м/с. Для атмосферы Земли $H = 8000$ м, $\rho_0 = 1,3$ кг/м³. Позднее, в [5], было принято МКТ в форме параллелепипеда с соотношением ребер, указанным в гл. 2, при $L_0 = 2,34$ м, $C_\xi = 1,5$, $K_{IC}^2 = 10^{15}$ Па²·м и прочих равных условиях (имеются в виду условия, принятые для сферического МКТ). Результаты расчетов приведены в табл. 4.1. На рис. 4.1 приведены зависимости $\delta U(z)$ и $\delta U'$ для МКТ обеих геометрий при $M_0 = 100$ т.

Как следует из табл. 4.1 и рис. 4.1, взаимодействие метеороида с атмосферой, независимо от формы, характеризуется его квазистатическим ($\tau_k \gg 1$) нагружением в фазе А, оканчивающейся интенсивной (в среднем через $\xi_k \approx 2-3$ км) 4- или 3-кратной фрагментацией. Это расчетное число актов фрагментации близко или совпадает с фактическими данными вышеупомянутых исследований АН СССР. Различия расчетных высот фрагментации МКТ разной формы представляются несущественными, хотя следует отметить, что разрушение параллелепипеда начинается и заканчивается на несколько больших высотах, чем сферы. Это можно объяснить его бóльшим лобовым сопротивлением C_ξ (1,5 против 1 у сферы, при близких площадях миделя) и менее благоприятным для прочности соотношением площадей миделя и поверхности разрушения ($\approx 1,6$ против 1), вследствие чего разрушающая нагрузка на параллелепипед достигается в более высоких слоях атмосферы.

Таблица 4.1

Результаты расчетов фрагментации железного МКТ [4, 5]

(при статическом K_{IC}^2)

Форма МКТ	k	z_k , км	ξ_k , км	τ_k	V_k , км/с	m_k	D_k или L_k , м	δU_k , %
$M_0 = 100$ т, $V_0 = 20$ км/с								
Сфера ($D_0 = 3$ м)	1	15,6	–	–	18,60	2	2,38	13,6
	2	14,5	1,79	240,6	18,33	4	1,89	16,0
	3	13,2	2,03	349,6	17,90	8	1,50	19,9
	4	11,5	2,57	576,2	17,10	16	1,19	26,9
Параллеле- пипед ($L_0 = 2,34$ м)	1	17,1	–	–	18,47	2	1,858	14,7
	2	15,9	1,83	399,4	18,18	4	1,474	17,4
	3	14,5	2,11	749,4	17,7	8	1,17	21,7
	4	12,7	2,82	1647,4	16,74	16	0,929	29,9
$M_0 = 300$ т, $V_0 = 12$ км/с								
Сфера ($D_0 = 4,19$ м)	1	7,7	–	–	10,42	2	3,32	24,5
	2	6,2	2,36	410,1	10,05	4	2,64	29,9
	3	3,6	3,94	922,6	9,08	8	2,09	42,7
Параллеле- пипед ($L_0 = 3,38$ м)	1	9,3	–	–	10,38	2	2,68	25,2
	2	7,8	2,41	658,3	9,98	4	2,13	30,9
	3	4,9	4,38	2048,4	8,87	8	1,69	45,4

Сравним результаты расчетов фрагментации метеороидов с M_0 , равной 100 и 300 т в фазе В. Пик интенсивности «перекачки» энергии $\delta U'$, создающий эффект «взрыва» МКТ, достигается при $M_0 = 100$ т на высоте $(z_{\max})_n \approx 10$ км (параллелепипед) или ≈ 8 км (сфера) (рис. 4.2). В случае $M_0 = 300$ т эти высоты составляют, соответственно, ≈ 5 км и ≈ 3 км. Эти результаты не противоречат факту, имевшему место (по независимым оценкам) на высоте от 6 до 58 км. К моменту удара о грунт ($z = 0$) в случае $M_0 = 100$ т часть энергии

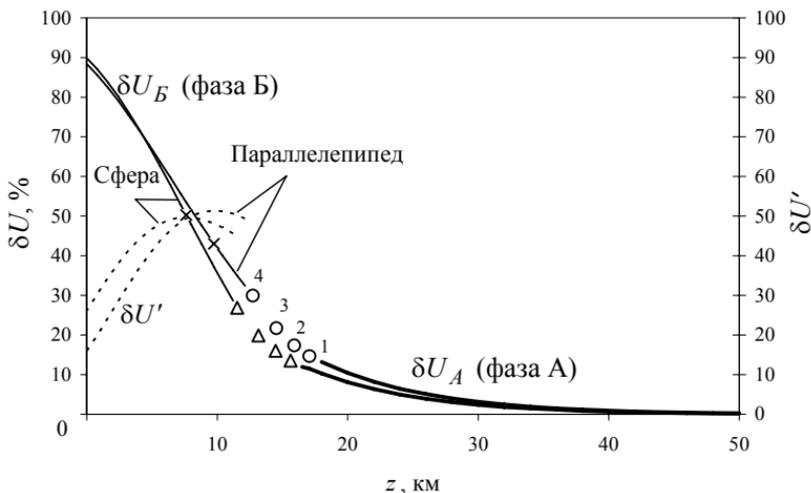


Рис. 4.1. Потеря энергии Сихотэ-Алинским метеороидом при торможении в атмосфере: $M_0 = 100$ т, $V_0 = 20$ км/с, $\alpha = 40^\circ$, — — δU , - - - $\delta U'$, \circ и Δ 1–4 соответствуют актам фрагментации, \times — значения $(z_{\max})_n$

метеороида, перешедшая в атмосферу (δU_B), составляет 88 % от начальной энергии $U_0 = 0,5M_0V_0^2$ (параллелепипед) или ≈ 90 % (сфера), а в случае $M_0 = 300$ т — ≈ 69 % или ≈ 67 %. При $M_0 = 100$ т расчетная скорость удара фрагментов метеороида о грунт (2.20) $V_{imp} \approx 6,8$ км/с (параллелепипед) или $\approx 6,4$ км/с (сфера), а при $M_0 = 300$ т — соответственно, $\approx 6,7$ или $\approx 6,9$ км/с. Энергия удара одного фрагмента эквивалентна энергии взрыва, соответственно, ≈ 34 или ≈ 30 т тротила ($M_0 = 100$ т) и ≈ 197 или ≈ 213 т ($M_0 = 300$ т). Как показывают оценки, по эмпирической формуле А. Б. Иванова [20], связывающей энергию наземного ядерного взрыва (U_{exp}) и диаметр образующегося при этом кратера

$$D_{kr}, \text{ км} \approx 1,96 \cdot 10^{-5} (U_{exp}, \text{ Дж})^{1/3,4}, \quad (4.1)$$

где в данном случае следует заменить U_{exp} на U_{imp} , этих энергий достаточно для образования кратеров диаметром ≈ 38 или ≈ 36 м ($M_0 = 100$ т) и ≈ 63 или ≈ 64 м ($M_0 = 300$ т). При $M_0 = 100$ т это близко к фактическим диаметрам крупных кратеров (от 9 до 26 м).

Вместе с тем расчетное количество фрагментов (16 при $M_0 = 100$ т или 8 при $M_0 = 300$ т) существенно меньше, чем обнаружено на кратерном поле (всего 24 кратера и около 200 воронок и лунок). Большее фактическое количество крупных фрагментов обусловлено, по-видимому, пониженной прочностью МКТ из-за фактической неоднородности его структуры, учесть которую не представляется возможным. Что же касается мелких фрагментов, то они образуют так называемое вторичное кратерное поле, так как, по-видимому, по большей части являются осколками крупных фрагментов, разрушившихся при ударе о твердый, например, скальный грунт.

Как указывалось выше, рассмотренная модель фрагментации относится к телам из гомогенных материалов. Однако вследствие неизбежного разброса физико-механических свойств материала в объеме реального метеороида, на самом деле размеры фрагментов будут характеризоваться некоторой дисперсией. При этом нельзя исключить, что на ряде этапов разрушения метеороид, или его фрагменты, будут распадаться не на 2, а на 3 части. Естественно ожидать, что статистическое распределение фрагментов по размерам фактически будет асимметричным, с резким ограничением в области больших размеров.

4.1.1.2. Рассеяние Сихотэ-Алинского метеороида. Эффективность модели рассеяния, изложенной в гл. 3, демонстрируется на примере распада железоникелевого Сихотэ-Алинского метеороида. Как указывалось выше, рассеяние МКТ есть вторая, заключительная фаза распада. Поэтому в качестве исходных данных для расчетов рассеяния используются результаты первой стадии (фрагментации), приведенные в п. 4.1.1.1.

Расчеты, результаты которых приведены в табл. 4.2, 4.3 и на рис. 4.2, проводились численным и аналитическим методами.

Таблица 4.2

Расчетные параметры распада и рассеяния фрагментов Сихотэ-Алинского метеороида
(параллелепипед)

k	$M_0 = 100 \text{ т, } V_0 = 20 \text{ км/с}$						$M_0 = 300 \text{ т, } V_0 = 12 \text{ км/с}$							
	1		2		3		4		1		2		3	
	Ч	А	Ч	А	Ч	А	Ч	А	Ч	А	Ч	А	Ч	А
Вид распада	0,4662	0,4695	0,4661	0,4695	0,4660	0,4695	0,4660	0,4695	0,4654	0,4695	0,4653	0,4695	0,4652	0,4695
φ_k^* , рад	65,47	64,51	86,99	86,08	115,81	114,99	154,11	153,45	41,28	40,81	54,87	54,48	72,94	72,74
φ_k^* , с ⁻¹	32,63	31,92	34,42	33,81	36,36	35,83	38,41	37,95	29,72	29,12	31,35	30,85	33,09	32,69
$\eta_{СК}^*$, м/с	32,63	31,92	47,43	46,50	59,76	58,70	71,04	69,90	29,72	29,12	43,20	42,42	54,41	53,56
$I_{\eta k}^*$, с	0,0209	0,0212	0,0157	0,0159	0,0118	0,0119	0,0088	0,0089	0,0331	0,0335	0,0248	0,0251	0,0186	0,0188
ξ_k^* , м	385,9	388,3	285,1	286,9	208,0	209,4	147,6	148,2	342,4	345,1	247,0	249,0	164,6	166,0
ξ_k^*/ξ_{k+1}^*	0,22	0,212	0,135	0,136	0,074	0,074	0,075	0,075	0,142	0,143	0,056	0,057	0,021	0,022
I_k^* , км/с	18,407	18,187	18,112	17,973	17,624	17,549	16,666	16,644	10,316	10,233	9,914	9,878	8,800	8,807
z_k^* , км	16,824	16,822	15,713	15,712	14,402	14,401	12,633	12,633	9,092	9,090	7,601	7,600	4,838	4,837
t_{fk} , с	0,0789	0,0793	0,1022	0,0969	0,1516	0,1518	1,350	1,353	0,2042	0,2048	0,4402	0,4409	0,6441	0,6695
ξ_{fk} , км	1,444	1,441	1,831	1,729	2,605	2,603	19,654	19,653	2,072	2,069	4,134	4,132	7,527	7,525
$R_{\eta k}$, м	2,58	2,53	7,94	7,54	17,55	17,27	114,0	112,36	6,07	5,96	25,82	25,40	61,67	62,05

Примечание. Ч – данные численных расчетов при $\delta \xi_{ks} = 1 \text{ м/с}$, А – данные аналитических расчетов при $\psi_1(\varphi) = 1$.

Таблица 4.3

Расчетные параметры рассеяния фрагментов
Сихотэ-Алинского метеороида на грунте

Параметр	Форма	$M_0 = 100$ т	$M_0 = 300$ т
V_{imp} , км/с	Сфера	6,35	6,93
	Параллелепипед	4,34	4,93
X , км	Сфера	0,218	0,136
	Параллелепипед	0,231	0,144
Y , км	Сфера	0,339	0,212
	Параллелепипед	0,359	0,224

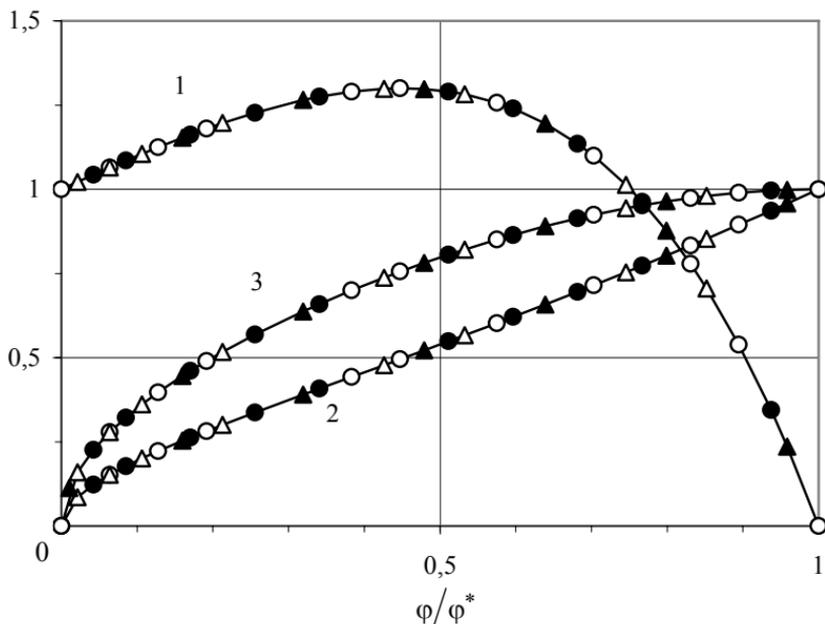


Рис. 4.2. Типичная взаимосвязь реакции соседнего фрагмента, угловой и поперечной скоростей k -го фрагмента: 1 — $Q_k(\varphi)/Q_k(0)$, 2 — $\dot{\phi}_k(\varphi)/\dot{\phi}_k^*$, 3 — $\dot{\eta}_k(\varphi)/\dot{\eta}_k^*$, \circ — $k=1$, \bullet — $k=2$, \triangle — $k=3$, \blacktriangle — $k=4$

Численные расчеты для МКТ обеих геометрий показали быструю сходимость результатов по мере уменьшения $\delta \dot{\xi}_s$, которая практически стабилизировалась уже при $\delta \dot{\xi}_s \leq 1$ м/с. Поэтому в табл. 4.2 даны результаты расчетов при $\delta \dot{\xi}_s = 1$ м/с. В этом случае значения параметра $\psi_1(\varphi)$ в (3.41), вычисленные, например, для прямоугольного МКТ, находились в пределах 0,99905–1,0120. Их очевидная близость к единице вполне оправдывает использование аппроксимирующей функции (3.42), по крайней мере, в данном случае, что подтверждает и практическое совпадение результатов, полученных обоими методами. Такое же совпадение было получено и для сферического МКТ (в табл. 4.2 эти данные не приводятся). Полученные результаты показали следующее:

1. Графики, приведенные на рис. 4.2 на примере прямоугольного МКТ, показывают, как в первой фазе рассеяния реакция контактирующих фрагментов (Q) обуславливает их поперечный разгон. Судя по формулам (3.16) и (3.47), этот фактор действует с самого начала (он в сильной прямой зависимости от траекторной скорости и размера фрагмента) и постепенно возрастает до максимума, а затем спадает и в критический момент, при $\varphi = \varphi^*$ (3.34), обращается в нуль. При этом угловая и поперечная скорости ($\dot{\varphi}_k$ и $\dot{\eta}_{Ck}$) возрастают от нуля до значений (3.50) и (3.51), соответственно, при которых контакт фрагментов прекращается. Замечательно, что в относительных координатах расчетные точки, полученные после разных актов фрагментации, ложатся на единые кривые.

2. После всех актов фрагментации выполняется условие свободного разлета фрагментов $\xi_k^*/\xi_{k+1} < 1$ (табл. 4.2). В противном случае их разлет не состоялся бы, и до очередного акта разрушения они двигались бы во взаимном контакте (см. гл. 3, п. 3.1.2).

3. Скорость удара о грунт фрагментов сферического МКТ заметно выше (в $\approx 1,5$ раза), чем прямоугольного (табл. 4.3). Это можно объяснить лучшим АД качеством сферы и, как следствие, меньшей суммарной потерей скорости в атмосфере.

4. Согласно [2], «размер основного эллипса рассеяния для наибольших кратеров составляет порядка $0,3 \times 0,5$ км». Полученные нами значения X и Y эллипса первичного поля рассеяния определяют его расчетные размеры, которые для сферического и прямоугольного МКТ практически совпадают. Так, при $M_0 = 100$ т и $V_0 = 20$ км/с они составляют $\approx 0,22 \times 0,34$ км (табл. 4.3, сфера) или $\approx 0,23 \times 0,36$ км (параллелепипед), а при $M_0 = 300$ т и $V_0 = 12$ км/с – соответственно, $\approx 0,14 \times 0,21$ км или $\approx 0,14 \times 0,22$ км. Очевидно, у более тяжелого и медленного МКТ расчетные размеры первичного поля рассеяния в ≈ 2 раза меньше. Если фактические размеры основного эллипса рассеяния для наибольших кратеров, указанные выше, относятся к первичному полю рассеяния, то согласие с ними его расчетных размеров можно считать удовлетворительным, и у «легкого» МКТ оно лучше, чем у «тяжелого».

4.1.2. Тунгусское Диво

Ранним утром 30 июня 1908 г. над Центральной Сибирью люди увидели в небе гигантский огненный шар, затмевавший Солнце. Он мчался прямо на фабрику Вановара, расположенную в почти безлюдном районе Подкаменной Тунгуски. За шаром тянулся 800-километровый дымный след, сохранявшийся несколько часов. Этот загадочный объект появился на высоте под углом $\approx 115^\circ$, и находившиеся в радиусе до 800 км люди (кстати, в большинстве верующие), оцепенев от ужаса, наблюдали, как он с грохотом пролетел в северо-западном направлении, опустился до $30\text{--}35^\circ$, после чего, казалось, скрылся за горизонтом. Там, на высоте от 8 до 10 км, появилась ярчайшая вспышка и прогремел невиданный по силе взрыв*, слышимый на расстоянии до 1000 км. При этом эхо взрыва было услышано даже в Лондоне (около 6000 км от места взрыва), воздушная волна давления дважды обогнула Землю, а также имели место мощные световое и тепловое излучения и сейсмические возмущения.

*По ряду сообщений – стремительная череда взрывов [16].

Случайно оказавшиеся неподалеку люди (в основном, эвенки-оленьеводы и охотники) и животные получили довольно сильные ожоги и были сбиты с ног действием воздушной УВ. Во многих селениях ощущалось сотрясение почвы и построек, подобное землетрясению, сыпались оконные стекла, падала с полок домашняя утварь, качались всяческие предметы и т.д. Много недель после этого из разных стран, особенно из Западной Европы, поступали сообщения о необычайно красочных восходах и закатах, над Восточной Сибирью и Средней Азией разыгрывались оптические фейерверки, а ночи были настолько светлыми, что можно было читать газету. Так называемые серебристые облака (в данном случае, по-видимому, пылевые), висевшие на высоте 40–70 км, сияли, отражая дневной свет, падавший на них из других частей планеты. Обсерватория в Иркутске (900 км к юго-востоку от места взрыва) зарегистрировала возмущения в магнитном поле Земли и магнитные бури, а сейсмостанция Санкт-Петербурга, удаленного на 4000 км, и иные станции мира зафиксировали такие же всплески, как при землетрясении.

Только в 1927 г. удалось направить к месту катастрофы первую экспедицию под руководством проф. Л. А. Кулика, которая установила, что эпицентр взрыва расположен на 62° северной широты и 101° восточной долготы, в 92 км к северу от Вановары. В зоне эпицентра был обнаружен обширный радиальный вывал тайги в радиусе 15–30 км от эпицентра и ожог деревьев в его окрестности, а в самом эпицентре стояла группа деревьев с обожженными стволами и обломанными ветвями (значит, взрыв, несомненно, был высотным). Вокруг эпицентра были найдены круглые ямы, заполненные водой и ошибочно принятые Куликом за метеоритные воронки. Позднее установили, что это естественные образования, обусловленные вечной мерзлотой. Была оценена энергия взрыва, равная примерно 10^{23} – 10^{24} эрг (10^{16} – 10^{17} Дж). Затем предпринималось еще несколько экспедиций, в том числе две под руководством Л. А. Кулика (1928–1930 гг.) и три – К. П. Флоренского (с 1958 г.), а также производилась аэрофотосъемка зоны эпицентра.

Тунгусскому явлению посвящена обширная научная и «околонаучная» литература (см., например, [10–16]). Однако не-

смотря на это, окончательно условия Тунгусского Дива, его природа и свойства до сих пор не выяснены и даже космическое происхождение подвергается сомнению [17,18]. Так, некоторые полагали, что причиной была «черная дыра», пронизавшая земной шар с юга на север, другие считали причиной вторжение в атмосферу сгустка антиматерии. Известны показания некоторых свидетелей, уверявших, что огненный шар двигался почти параллельно поверхности Земли и при этом два или три раза менял направление полета. Последнее вряд ли имеет удовлетворительное объяснение, с точки зрения здравого смысла, и нельзя исключить, что оно, как и многие другие свидетельства, весьма субъективно и, скорее всего, есть плод фантазии очевидцев, разыгравшейся у них после пережитого.

Тем не менее, японские уфологи не сомневались, что это взорвался космический корабль с пришельцами. «Мастера пера», конечно же, не могли пройти мимо этой «жгучей» темы. Так, например, известные писатели-фантасты А. Казанцев (СССР) и С. Лем (Польша) опубликовали романы, в которых каждый по-своему объясняли Тунгусскую загадку именно как катастрофу инопланетного космического корабля. По еще одной из версий, взрыв мог быть вызван детонацией скопления природного газа, самопроизвольно выделившегося из газоносных геологических пластов. Его примесь в воздухе достигла нужной концентрации и, вспыхнув от случайной искры (в атмосфере они нередки), сдетонировала, со всеми вытекающими последствиями*. Однако несмотря на физическую возможность, о таком развитии событий, очевидно, здесь неуместно говорить, так как оно не могло бы способствовать всем тем упоминавшимся эффектам: стремительному перемещению по небу огненного шара, дымному следу и, наконец, звуковым эффектам, засвидетельствованным подавляющим большинством очевидцев. По одной из последних версий, обнародованных в 80-х гг. XX века, отсутствие следов метеороида на грунте объясняется тем, что он мог срикошеть от воздушной «подушки», образовавшейся при взрыве, и уле-

* Аналогичные случаи взрывов бытового газа в квартирах, к сожалению, нередки.

теть достаточно далеко от эпицентра взрыва (по аналогии с камушком, ricochetящим от воды, если его бросить под острым углом к ее поверхности). Так что, по мнению автора гипотезы, искать метеороид или его фрагменты надо было где-то по ходу траектории. Потом в эфире прозвучало, что якобы на этом направлении автор гипотезы действительно нашел в тайге объект, похожий на крупный метеорит, к сожалению, нетранспортабельный. Удалось ли заинтересовать этой находкой специалистов – неизвестно. Скорее всего нет, так как вскоре шумиха вокруг нее угахла.

Большинство же специалистов сегодня считают, что все-таки это была встреча Земли с астероидом или кометой, ядро которой представляло собой, по-видимому, весьма рыхлую, как бы снежную массу из воды и замерзших газов (метана, аммиака и др.). Однако отождествить найденные в образцах почвы и древесины из зоны взрыва магнетитовые и силикатные шарики и пылинки микронных размеров только с кометой оказалось невозможным, хотя, по современным представлениям, они вполне могли быть включениями в ее ядре. В 1975 г. академик Г. И. Петров (Институт космических исследований, Москва) определил, что Тунгусское тело было не более чем в 10 раз плотнее воздуха у поверхности Земли и «представляло собой рыхлый ком снега радиусом 300 м и плотностью менее $0,01 \text{ г/см}^3$ ». По современным представлениям [16], масса Тунгусского тела оценивается в $\approx 10^5$ т, а мощность взрыва – в ≈ 40 Мт ТНТ, что в 2000 раз мощнее атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму (1945 г.). Следовательно, по этим данным энергия взрыва составляла бы $\approx 1,7 \cdot 10^{17}$ Дж и, при радиусе тела 300 м, плотность его была бы $\approx 0,001 \text{ г/см}^3$, что удовлетворительно согласуется с оценкой Г. И. Петрова. Однако для такой энергии потребовалась бы скорость тела на момент взрыва ≈ 60 км/с, что маловероятно, и, по-видимому, данная оценка энергии взрыва некорректна.

Гораздо реалистичнее оценка энергии взрыва в $4 \cdot 10^{16}$ Дж (это на порядок ниже, чем в [16]), установленная в ряде исследований по вывалу леса в эпицентре взрыва. При этой энергии скорость тела на момент взрыва была бы ≈ 30 км/с. Как бы то ни было, в ра-

боте С. Григоряна [13] гипотеза Г. И. Петрова и результаты расчетов на ее основе [12] представляются небезупречными и не доведенными до убедительно ясной картины явления. По данным [13], при вторжении в атмосферы планет твердых хрупких тел (каменные и железокатенные метеороиды, ледяные образования – ядра комет) существует широкая область значений основных исходных параметров явления, для которых движение тела завершается его дроблением и полным диспергированием в атмосфере, так что оно не достигает поверхности планеты, а его кинетическая энергия быстро передается атмосферному газу в малом объеме с последующим распространением ударных волн, подобных взрывным. По его мнению, именно такого рода процесс имел место при Тунгусском событии.

Оценим имеющиеся исходные данные. Их явно недостаточно. Единственный более-менее надежный параметр – энергия взрыва, оцененная по фактическому результату – площади лесоповала. Все прочее либо весьма и весьма приблизительно, так как основано в большинстве своем на субъективной информации, либо и вовсе неправдоподобно.

Тем не менее, авторами было проведено моделирование фрагментации данного МКТ, полагая, что это был метеороид или ядро кометы. Результаты расчетов опубликованы в [17, 18]. В связи с существенной неопределенностью исходных данных, расчеты проводились для сферического МКТ из ряда материалов, обычно свойственных метеороиду, а именно: льда ($\rho_b = 900 \text{ кг/м}^3$, $K_{IC}^2 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$ [19], $C_b = 2000 \text{ м/с}$, $E = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Па}$), песчаника (соответственно, 2200 кг/м^3 , $10^{11} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$, 2900 м/с , $1,9 \cdot 10^{10} \text{ Па}$), гранита (2700 кг/м^3 , $9 \cdot 10^{11} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$, 5400 м/с , $3,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$) и железа (7800 кг/м^3 , $10^{15} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$, 5900 м/с , $2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$) [8]*. За начальную кинетическую энергию метеороида U_0 принято $4 \cdot 10^{16} \text{ Дж}$,

*Для гранита и железа значения E взяты из справочников, а для льда и песчаника оценены по известной формуле $E = \rho_b C_b^2$.

а наиболее вероятную скорость – 2-я космическая $V_0 = 11000$ м/с. Данным параметрам соответствует масса МКТ $M_0 \approx 6,6 \cdot 10^8$ кг, что при заданном ρ_b позволяет найти D_0 . По оценкам [11, 14], угол снижения α составлял 17° или 40° . В расчетах принято α , равное 17° и 30° . Основные результаты расчетов приведены в табл. 4.4 (по состоянию при первом и последнем актах фрагментации и при ударе о грунт), где, кроме известных параметров, $\delta U_{imp} = (V_{imp}/V_0)^2$ – доля энергии удара фрагментов о грунт в начальной кинетической энергии МКТ, V_{imp} определяется по (2.23). Для оценки влияния трещиностойкости фрагментов ряд расчетов выполнен при значениях K_{IC}^2 , в 10^2 раз больших (серии Л4, П2, Г2, Ж2). Считалось, что их результаты в большей мере отвечают реально возможным. Однако если проследить кинетику фрагментации по параметру τ_k (2.21), то его минимальные значения составляют (табл. 4.4, τ_{min}) $\approx 4-6$ (лед), $\approx 5-7$ (песчаник), ≈ 15 (гранит) и ≈ 23 (железо), т. е. $\tau_{min} > 1$, что свидетельствует о близости нагружения фрагментов к квазистатическому.

Недавно, уже в процессе работы над книгой, авторам стали известны иные данные о низкотемпературной прочности льда, хондрита и никелистого железа. Так, по сообщению В. И. Даниленко о трещиностойкости пресноводного льда, опубликованному в журнале «Механика твердого тела» (1985, № 5, с. 135), при понижении температуры от 0 до -15°C его K_{IC}^2 повышается от $4,4 \cdot 10^4$ до $9,6 \cdot 10^4$ Па²·м. Экстраполируя эти данные в область космической температуры (-180°C), получаем $K_{IC}^2 \approx 5 \cdot 10^8$ Па²·м, т. е. среднее между принятыми в табл. 4.4 значениями $1,6 \cdot 10^7$ и $1,6 \cdot 10^9$ Па²·м, поэтому дополнительные расчеты не нужны, так как их результаты, соответственно, тоже будут средними.

Таблица 4.4

Результаты расчетов фрагментации Тунгусского метеороида

Связь	C_{ξ}	α , град.	K_{IC}^2 , Па ² ·м	z_1 , км	V_1 , м/с	n	z_n , км	V_n , м/с	$(z_{max})_n$, км	z_{loss} , км	m_n	D_n , м	δU_{cr} , %	δU_n , %	τ_{min}	δU_{imp} , %
Лед ($\rho_b = 900$ кг/м ³ , $C_b = 2000$ м/с, $D_0 = 112$ м)																
Л1	1	17	$1,6 \cdot 10^7$	93,6	10999,98	34	61,1	9737,45	57,8	≈ 41	$1,7 \cdot 10^{10}$	0,043	$6,3 \cdot 10^{-4}$	21,6	6,5	≈ 0
Л2	1	30	$1,6 \cdot 10^7$	93,6	10999,99	36	58,5	9271,92	57,2	≈ 40	$6,9 \cdot 10^{10}$	0,027	$2,5 \cdot 10^{-3}$	29,0	3,8	≈ 0
Л3	1,5	30	$1,6 \cdot 10^7$	93,6	10999,98	35	58,9	8964,40	58,6	≈ 42	$3,4 \cdot 10^{10}$	0,034	$1,3 \cdot 10^{-3}$	33,6	3,8	≈ 0
Л4	1	30	$1,6 \cdot 10^9$	75,1	10999,86	29	47,2	9660,86	44,2	≈ 27	$5,4 \cdot 10^8$	0,138	$2,0 \cdot 10^{-3}$	22,9	3,8	≈ 0
Песчаник ($\rho_b = 2200$ кг/м ³ , $C_b = 2900$ м/с, $D_0 = 83,1$ м)																
П1	1	30	10^{11}	57,4	10999,28	25	30,9	8368,84	32,1	≈ 15	$3,4 \cdot 10^7$	0,258	$8,2 \cdot 10^{-4}$	42,1	7,4	≈ 0
П2	1	30	10^{13}	39,0	10992,82	18	20,6	9312,33	19,1	≈ 2	$2,6 \cdot 10^5$	1,298	$6,4 \cdot 10^{-4}$	28,3	7,4	0,003
П3*	1	30	10^{11}	70,8	29999,28	27	45,0	26796,68	41,1	≈ 24	$1,3 \cdot 10^8$	0,083	$8,6 \cdot 10^{-4}$	20,2	5,3	≈ 0
Гранит ($\rho_b = 2700$ кг/м ³ , $C_b = 5400$ м/с, $D_0 = 77,6$ м)																
Г1	1	30	$9 \cdot 10^{11}$	48,3	10998,06	22	25,5	8893,51	25,4	≈ 8	$4,2 \cdot 10^6$	0,481	$4,3 \cdot 10^{-4}$	34,6	14,7	≈ 0
Г2	1	30	$9 \cdot 10^{13}$	29,9	10980,52	15	14,6	9453,56	12,5	≈ 0	$3,3 \cdot 10^4$	2,425	$3,3 \cdot 10^{-4}$	26,1	14,8	1,4
Г3	1	30	$9 \cdot 10^9$	66,8	10999,8	28	39,9	9733,0	36,5	0,6	$2,7 \cdot 10^8$	0,12	$1,9 \cdot 10^{-4}$	21,7	29,5	≈ 0

Окончание табл. 4.4

Серия	C_{ξ}	α , град.	K_{IC}^2 , Па ² ·м	z_1 , км	V_1 , м/с	n	z_n , км	V_n , м/с	$(z_{max})_n$, км	z_{loss} , км	m_n	D_n , м	δU_{cr} , %	δU_n , %	τ_{min}	δU_{imp} , %
Железо ($\rho_b = 7800$ кг/м ³ , $C_b = 5900$ м/с, $D_0 = 54,5$ м)																
Ж1	1	30	10^{15}	18,8	10961,72	13	5,45	9498,26	3,1	–	$8,2 \cdot 10^3$	2,704	$8,0 \cdot 10^{-5}$	25,4	23,2	35,9
Ж2	1	30	10^{17}	–	11000,0	0	–	10603,65**	–	–	1	54,5	0	0	–	92,9
Ж3	1	30	10^{13}	37,3	10996,2	20	16,6	9025,5	16,1	–	$1,05 \cdot 10^6$	0,536	10^{-4}	32,7	45,9	0,1
Ж4	1	30	$***10^{13}$	50,7	29996,2	23	26,7	23848,8	27,0	–	$8,39 \cdot 10^6$	0,137	$3,3 \cdot 10^{-6}$	36,8	32,8	$4 \cdot 10^{-11}$

* Рассчитано для $V_0 = 30$ км/с (серия ПЗ, соответственно, $D_0 = 42,6$ м).

** Приведена скорость удара о грунт.

*** Приведен расчет при $V_0 = 30$ км/с и, соответственно, $D_0 = 28$ м.

Что касается метеоритного железа, то его фактические прочностные характеристики (прежде всего вязкость разрушения), по-видимому, значительно ниже, чем у однородного никелистого железа, и сравнимы с таковыми у хондритных тел. Это результат низкотемпературных испытаний при воздействии сверхзвуковых газовых потоков на образцы из крупных индивидуальных фрагментов, найденных после известных метеоритных дождей Царев (обыкновенный хондрит) и Сихотэ-Алинь (железный грубый октаэдрит). Данные сведения приведены в реферате доклада сотрудников Уральского государственного технического университета – УПИ (г. Екатеринбург) В. И. Гроховского и А. Ф. Кокорина «Прочность и разрушение метеоритных тел с неоднородной структурой», представленного для Международной конференции «Космическая защита Земли» (г. Снежинск, 1996).

Учитывая результаты этих исследований, в табл. 4.4, наряду с ранее опубликованными результатами для гранита и железа, приведены дополнительные, полученные при значениях K_{IC}^2 , меньших номинала в 10^2 раз (серии Г3 и Ж3, Ж4).

Наконец, для оценки влияния начальной скорости на кинетику дробления тела принято в сериях П3 и Ж4 $V_0 = 30$ км/с. Потеря энергии МКТ («перекачка» энергии в УВ) иллюстрируется зависимостями $\delta U(z)$ на рис. 4.3.

Из табл. 4.4 и рис. 4.3 следует, что в фазе А происходит интенсивная (в среднем через $\xi_k \approx 2-3$ км) фрагментация прочного МКТ при $z \geq z_n$, а в фазе Б (при $z \leq z_n$) – интенсивное торможение роя образовавшихся фрагментов (для МКТ, менее прочных, чем железо – практически до полной потери энергии). В фазе А затраты энергии МКТ на фрагментацию (δU_{cr}), очевидно, ничтожны, по сравнению с общей потерей энергии (δU_n), и именно в фазе Б происходит «перекачка» большей части энергии МКТ в УВ, и, следовательно, может реализоваться эффект его «взрыва». Условная граница между фазами зависит от физико-механических свойств материала МКТ и размеров фрагментов. Для достаточно прочного

ятной причиной Тунгусского феномена было вторжение в атмосферу Земли небесного тела из льда или (при номинальных K_{IC}^2) из породы типа песчаника или гранита. В этих случаях, при $V_0 = 11$ км/с, фаза А начинается по мере вхождения МКТ в достаточно плотные слои атмосферы еще далеко за пределами стратосферы – на высотах термо- и мезосферы: при $z_1 \approx 94$ км (серии Л1–Л2), ≈ 57 км (П1) и ≈ 48 км (Г1). Дробление тела из этих материалов протекает соответственно за 34–36, 25 и 22 акта при снижении в мезо- и стратосферу: до высот $z_n \approx 58$ –61, ≈ 31 и ≈ 25 км, где потери кинетической энергии метеорита составляют ≈ 22 –29 %, ≈ 42 % и ≈ 35 %. В фазе Б происходит «перекачка» в атмосферу основной части энергии МКТ (от ≈ 60 % до ≈ 70 %) с практически полной потерей скорости при снижении в страто- и тропосферу: до высот $z_{loss} \approx 40$, ≈ 15 и ≈ 8 км, причем максимальное АДС фрагментам достигается выше: при $(z_{max})_n \approx 57$ –58 км (Л1–Л2), ≈ 32 км (П1) и ≈ 25 км (Г1), где по расчетам и реализуется эффект «взрыва» метеороида. Однако это, конечно, значительно выше, чем свидетельствовали очевидцы.

Итак, в рамках данной модели с учетом принятых допущений и при номинальном значении K_{IC}^2 можно было бы предположить, что наиболее вероятным мог быть метеороид из льда. С одной стороны, его относительно низкая температура плавления, огромное количество фрагментов в конце фрагментации и их, соответственно, весьма малые размеры обуславливают их интенсивную абляцию, поэтому вероятность достижения ими поверхности Земли представляется очень малой. Но даже если бы это и произошло, энергия удара была бы недостаточной для образования заметного следа, да еще на лесисто-болотистой местности: упали льдинки, растаяли, и гадай потом, откуда взялись эти лужицы. Однако, с другой стороны, при этом они были бы удалены от эпицентра взрыва на $[(z_{max})_n - z_{loss}] \text{ctg}\alpha \approx 55$ км (Л1) или ≈ 30 км (Л2). К тому же расчетная минимальная высота «взрыва», по нашим данным (≈ 60 км), существенно расходится с высотой ≈ 10 км (или ≈ 8 км

[14]), оцененной по свидетельствам очевидцев. Поэтому, если даже принять во внимание субъективный характер оценки свидетелей и вполне возможное влияние на нее оптических эффектов в атмосфере (как известно, они могут быть достаточно сильными), указанное расхождение вряд ли можно считать допустимым. Наконец, «взрыв» МКТ на такой высоте, скорее всего, вызвал бы только световые и звуковые эффекты и вряд ли привел бы к опустошениям, имевшим место на планете. Этот вывод об очевидно малой вероятности МКТ изо льда не противоречит и данным [13].

Гораздо выше вероятность состава МКТ из породы типа песчаника (или еще менее прочной) или гранита. Так, у МКТ из песчаника при номинальном значении K_{IC}^2 , т. е. в серии П1, во-первых, образуется $3,4 \cdot 10^7$ фрагментов размером 26 см, скорость которых полностью теряется на высоте ≈ 15 км, после чего они находятся в состоянии свободного падения, и при ударе о грунт их скорость составляет всего ≈ 550 м/с, значит, и кратеров на грунте быть не должно (так, ямки того же диаметра, что и фрагменты, тут же залитые водой и незаметные в болотистой местности). Во-вторых, эффект «взрыва» реализуется на высоте ≈ 32 км, т. е. существенно ниже, чем у ледяного МКТ. Серию же П2 следует исключить: хотя здесь высота «взрыва» $z_{\max} \approx 19$ км, т. е. ближе к фактической, чем у П1, но она соответствует значению K_{IC}^2 , в 100 раз большему номинального, т.е. далекому от реального. В этом случае энергия удара фрагментов о грунт составляет 0,003 % от исходной (U_0), и оценка по эмпирической формуле А. Б. Иванова (4.1) показывает, что на грунте наблюдались бы многочисленные кратеры диаметром ≈ 2 м, но на удалении от эпицентра взрыва ≈ 30 км. Никто их там, конечно, не искал, так как район поисков был ограничен местностью вокруг эпицентра взрыва, где таких ям с водой предостаточно и, как известно, они весьма похожи на естественные тундровые образования. Наконец, в серии П3 увеличение скорости в ≈ 3 раза повлекло бы повышение участка фрагментации до высот от ≈ 71 до 45 км, и после реализации эффекта «взрыва» на высоте ≈ 41 км фрагменты

диаметром ≈ 8 см потеряли бы скорость на высоте ≈ 24 км и выпали бы на грунт в ≈ 30 км от эпицентра взрыва со скоростью ≈ 700 м/с, образовав ямки диаметром ≈ 70 см, т. е., как указывалось выше, очень похожие на естественные тундровые образования. И это – без учета абляции, в противном случае фрагменты были бы еще меньшими и, скорее всего, не оставили бы следов.

Столь же вероятен и МКТ из гранита, так как при номинальном значении K_{IC}^2 (серия Г1) размеры его фрагментов составляли бы $\approx 0,5$ м. При этом после «взрыва» на высоте ≈ 25 км фрагменты потеряли бы траекторную скорость практически на высоте ≈ 8 км и выпали бы на грунт со скоростью ≈ 400 м/с на удалении ≈ 30 км от эпицентра взрыва, образовав многочисленные кратеры диаметром $\approx 2,5$ м в виде ям с водой. Но кто отличит их от естественных? Столь же близка к реальности и ситуация при значении K_{IC}^2 , в 100 раз меньше номинала (Г3). Правда, здесь эффект «взрыва» проявился бы на существенно большей высоте (≈ 36 км), но фрагменты были бы еще мельче ($\approx 0,1$ м), потеряли бы скорость на высоте 600 м и не оставили бы следов на местности.

Вероятность железного метеороида в сериях Ж1 и Ж2 следует исключить: даже при номинальном K_{IC}^2 размер его фрагментов составил бы ≈ 3 м, и они выпали бы на грунт всего в ≈ 5 км от эпицентра взрыва, т. е. в зоне поисков. Удар каждого из них был бы эквивалентен взрыву ≈ 440 т тротила с образованием кратера диаметром ≈ 80 м, что, конечно, не осталось бы незамеченным. Серия Ж2 (при K_{IC}^2 , в 100 раз большем) тем более невероятна. Существенно ближе к реальности серии Ж3 и Ж4 (при K_{IC}^2 , в 100 раз меньшем номинала). В серии Ж3 зона фрагментации была бы на высотах от ≈ 37 до ≈ 17 км, и «взрыв» состоялся бы на реальной высоте ≈ 16 м. Фрагменты размером $\approx 0,5$ м оставили бы на грунте кратеры диаметром ≈ 3 м, вряд ли отличимые от естественных ям, да еще в ≈ 23 км от эпицентра взрыва, где они упали. В серии Ж4 начальная скорость повышена до 30 км/с, поэтому зоны фрагментации

и «взрыва» поднялись, соответственно, до ≈ 51 –27 км и 27 км. Однако количество фрагментов возросло в 8 раз, а их размер, соответственно, уменьшился до ≈ 14 см. На грунт они выпали бы в ≈ 50 км от эпицентра взрыва со скоростью ≈ 700 м/с, оставив кратеры диаметром $\approx 1,5$ м, позже залитые водой и тоже не отличимые от обычных тундровых образований.

Итак, согласно приведенным выше расчетным оценкам, единственно, из чего не мог быть Тунгусский метеороид, так это изо льда, а из прочих материалов, т. е. песчаника, гранита и железа, он вполне мог бы состоять. А то, что фрагменты его не были найдены, так их, наверное, не там искали, ведь в большинстве рассмотренных случаев они могли выпасть на значительном удалении от эпицентра взрыва, где и надо бы еще поискать.

Так что никакого «Дива», по-видимому, не было, господа!

4.1.3. «Чикскулубский САТАНА»*

Французский зоолог XVIII–XIX вв. Ж. Кювье, знаменитый, в частности, крупнейшими работами в области систематизации животных, сводя фактические материалы по сравнительной зоологии и палеонтологии в «естественную» систему, обратил внимание на отчетливые свидетельства резких смен флор и фаун в последовательных геологических пластах Земли. Отстаивая религиозные представления о сотворении и неизменяемости видов и отсутствии переходных форм между разными типами организации, он для объяснения смен биоты выдвинул теорию катастроф (1812 г.). Согласно этой теории, в результате стихийных бедствий, периодически случавшихся на значительной части земного шара, погибало все живое, после чего его поверхность заселялась новыми формами, поступающими из других мест.

Эта концепция долго оспаривалась специалистами, отнюдь не отрицавшими смену одних форм другими, но представлявшими ход этого процесса как плавный, а не скачкообразный. Однако кризис биоты, явные следы которого недавно были обнаружены на

*Материал публикуется впервые.

границе мелового и третичного периодов («С–Т» или «мел–палеоген») в истории Земли, несомненно, был катастрофическим. В самом деле, вдруг, как говорится, ни с того, ни с сего, одновременно вымерли динозавры, птерозавры, морские рептилии и доминантные головоногие, резко сократилось разнообразие планктонных организмов. По современным оценкам, Земля лишилась от 75 % до 90 % биоты [21–25]. Этот кризис был глобальным и затронул представителей многих, даже далеких друг от друга, групп, поэтому требовал такого же глобального объяснения.

Объяснения, прежде всего гибели динозавров, предлагались самые экзотические – от межпланетного сафари пришельцев до «старения» крупных систематических групп по аналогии со старением отдельного организма. Однако специализация в рамках конкретного плана старения рано или поздно заводила в тупик. При этом повышенное внимание к гигантским ящерам как бы затушевывало массовый характер кризиса. Более правдоподобные теории связывали его с регрессией моря и мощным вулканизмом в ту эпоху (например, на Индостане). Однако эти процессы длились сотни тыс. лет и могли бы объяснить постепенную смену фаун, но не тот апокалипсис на резкой границе «С–Т», которую, похоже, провел все-таки внеземной фактор. Толчком к такой догадке послужили следующие обстоятельства.

Границе «С–Т» в земных пластах соответствует относительно тонкий слой глины, образовавшийся как раз 65 млн. лет назад. В 1980 г. близ селения Губбио (Умбрия, Италия), а потом еще в сотне мест в этом слое обнаружили аномально высокое содержание иридия – тяжелого металла платиновой группы, крайне редкого на Земле, но обычного в астероидах и космической пыли. Концентрация иридия в образцах из Губбио в 35 раз превышала уровень, нормальный для Земли. Кроме того, глина содержала странные зерна кварца, которые, как показал анализ, в том числе микроскопический, испытали необычайно высокое давление, что можно было объяснить только результатом столкновения с очень быстро движущимся объектом. Суммируя эти факты, Уолтер Алварес, геофизик из Ка-

лифорнийского университета (Беркли, США), и его отец Луис* предположили падение на Землю гигантского метеороида диаметром 16 км со скоростью примерно 160 тыс. км/ч (≈ 44 км/с) [23].

Эта теория привлекла внимание научной общественности и относительно быстро была подтверждена результатами исследований различными методами (геохимическими, минералогическими, физическими), что позволило заключить: да, на границе «С–Т» с нашей планетой столкнулось огромное небесное тело, оставившее собственные следы (иридий, никельмагнетит) и изменившее земные породы (их оплавление, деформация минералов). Был найден и подходящий метеоритный кратер, обнаруженный в Мексиканском заливе у северного побережья полуострова Юкатан (Мексика), близ пос. Чикскулуб (рис. 4.4 на цветной вкладке). Этот кратер имеет поистине циклопические размеры: диаметр, по разным данным, от 150 до 300 км, глубина, судя по оплавлению пород, до 30 км. Кратер перекрыт поздними отложениями, а дно его покрыто тонким слоем иридия. По современным представлениям [21–25], он, вероятно, образовался от удара астероида диаметром 10–12 км и массой $\square 10^9$ т, летевшего со скоростью, по разным данным, от $\square 10^5$ км/ч (≈ 30 км/с) до более чем в 200 раз превышавшей скорость звука (т. е. свыше 66 км/с). При ударе выделилась энергия, эквивалентная энергии взрыва $\square 10^7 - 10^8$ Мт ТНТ ($\approx 4 \cdot 10^{22} - 4 \cdot 10^{23}$ Дж), и произошло смещение до $5 \cdot 10^4$ км³ скальных пород, причем астероид частично или полностью испарился. По земному шару устремилась мощнейшая воздушная УВ. И сколько же раз она прокатилась по нему, сметая все на своем пути, если даже при Тунгусском взрыве, в $\square 10^5 - 10^7$ раз менее мощном, воздушная волна давления дважды обогнула земной шар?! Специалисты рисовали ужасающие картины катастрофы: гигантские цунами с волнами высотой до 5 км неслись по океанам со скоростью до 7 км/с, адские огненные дожди горевшей серы сменялись столь же губительными кислотными ливнями-

*Лауреат Нобелевской премии (1968 г.) за работы в области физики элементарных частиц.

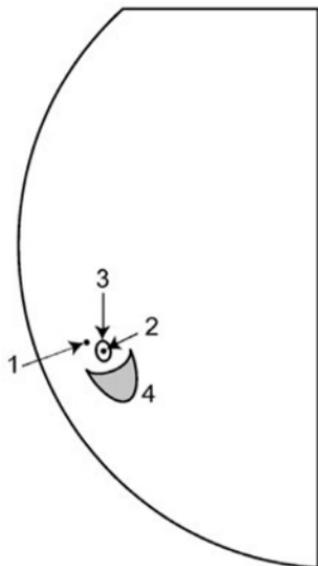


Рис. 4.8. Вид Юпитера после внедрения в его атмосферу фрагментов «D» и «С» кометы Шумейкеров—Леви 9 (1994 г.) и схема расположения следов ударов. Левое пятно (1) — место взрыва «D» (17 июля), правое (2, 3)— взрыва «С» (18 июля). Здесь центральное пятно (2, его диаметр 2,5 км) окружено тонким кольцом расширяющейся УВ (3, диаметр 7,5 км), ниже которого видно широкое серое полукольцо (4) из газов, выброшенных взрывом. Фото получено спустя 105 мин. после взрыва «С». Изображение любезно предоставлено Hubble Space Telescope Comet Team и NASA (3700 San Martin Drive, Baltimore, Maryland 21218, USA, august 1994)

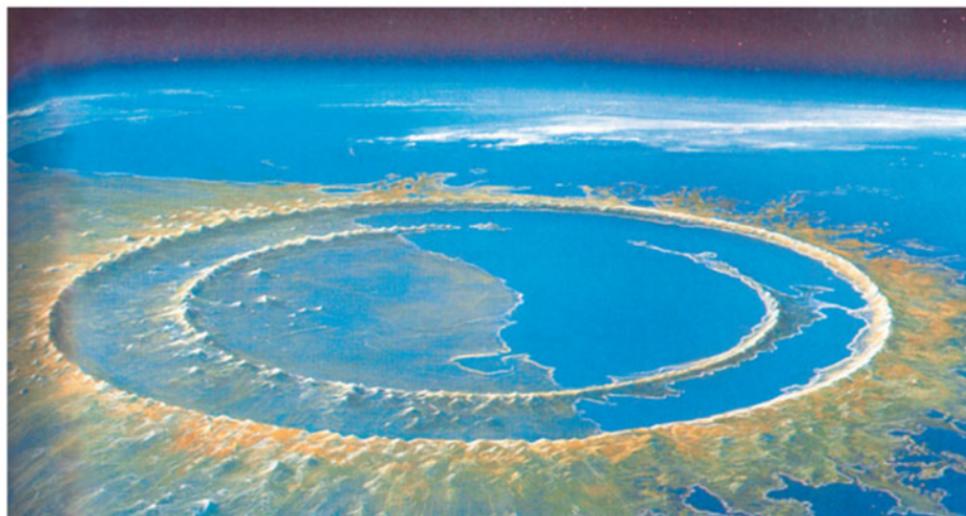


Рис. 4.4. Мексиканский кратер Чикскулуб (реконструкция) [22] и карта-схема зоны кратера [24]

Динозавр не знает, что жить ему осталось, увы, несколько минут

ми, практически прекратился фотосинтез, так как непроницаемые для света тучи дыма, пыли и пара надолго закрыли небо. Так мало этого – облака существенно повысили альбедо атмосферы, и значительная часть живительной солнечной энергии отражалась в космос, не достигая земной поверхности. Все это, вместе взятое, привело к так называемой «ударной зиме», длившейся годы или даже десятки лет. Апофеозом трагедии стала гибель почти всего живого.

По общему мнению, Чикскулубский астероид пронизал атмосферу без фрагментации (кратер-то один)*, причем, судя по всему, состав его неизвестен, хотя в кратере обнаружены следы иридия и никельмагнетита**. Поэтому рассмотрим возможные варианты состава данного МКТ, основываясь на вышеуказанных данных о его массе, размерах, скорости удара и выделившейся энергии (кстати, выделившуюся энергию представляется целесообразным считать наиболее надежным параметром, потому что она оценивается специалистами по фактическим данным, таким, как размеры кратера и масса перемещенного грунта):

1) Поскольку масса и диаметр МКТ оценены как $\sim 10^9$ т и 10–12 км, то при сферической форме тела, его средняя плотность может быть $\rho_b \approx 1-2 \text{ кг/м}^3$. Это близко к плотности атмосферы у поверхности Земли ($1,3 \text{ кг/м}^3$). Газовый астероид?! Такое науке неизвестно, да и физически нереально. Ведь для скопления газа и удержания его в облаке требуется либо внешнее давление, либо достаточно сильное гравитационное взаимодействие газовых частиц, однако в условиях космоса первое отсутствует, а второе при таком количестве газа ничтожно. Поэтому возникший в космосе каким-то немислимым образом «газовый» астероид такой массы неминуемо рассеялся бы в пространстве еще до встречи с Землей, не говоря уж о движении в ее атмосфере, где от него очень скоро не осталось бы и следа.

*В табл. 4.7 (вариант 7.1) показано, что фрагментация все-таки имела место.

**Никельмагнетит – магнитный железняк с примесью никеля.

Итак, следует констатировать: либо масса, либо размеры астероида, либо и то, и другое оценены некорректно. Поскольку все-таки астероид подразумевается как твердое тело, скорее всего из известного в метеоритике материала, такого, как лед, горная порода или железо, следует остановиться на его размере, и энергии взрыва (или удара), как наиболее надежных данных. В таком случае, при каком-либо из этих материалов (их плотности, соответственно, 900, 3500 или 7800 кг/м³) масса астероида при диаметре 10 км составила бы $\approx 5 \cdot 10^{11}$, $2 \cdot 10^{12}$ или $4 \cdot 10^{12}$ тонн, т. е. на 2–3 порядка больше, чем было оценено ранее.

2) Возможны 4 варианта, основанные, для определенности, на диаметре астероида $D_0 = 10$ км, а именно:

Вариант 1. За начальные параметры астероида условно приняты вышеупомянутые $V_0 = 70$ км/с и энерговыделение при взрыве $U_0 = 4 \cdot 10^{22}$ Дж. Мы сознательно считаем данные значения V_0 и U_0 условными, так как имеем дело с оценками этих параметров на уровне Земли, т. е., скорее всего, пониженными после взаимодействия тела с атмосферой. При этом плотность и масса астероида составят $\rho_b \approx 30$ кг/м³ (близко к плотности свежеснежавшего снега [26]) и $M_0 = \pi \rho_b D_0^3 / 6 \approx 1,6 \cdot 10^{10}$ т.

Вариант 2. Значениям $V_0 = 30$ км/с и $U_0 = 4 \cdot 10^{22}$ Дж соответствуют $M_0 \approx 0,9 \cdot 10^{11}$ т и $\rho_b \approx 170$ кг/м³ (близко к плотности сухого снежного покрова в начале зимы).

Вариант 3. Значениям $V_0 = 70$ км/с и $U_0 = 4 \cdot 10^{23}$ Дж соответствуют $M_0 \approx 1,6 \cdot 10^{11}$ т и $\rho_b \approx 310$ кг/м³ (близко к плотности сухого снежного покрова в конце зимы).

Вариант 4. При $V_0 = 30$ км/с и $U_0 = 4 \cdot 10^{23}$ Дж $M_0 \approx 0,9 \cdot 10^{12}$ т и $\rho_b \approx 1700$ кг/м³ (близко к плотности льда с примесью песка).

Из всех этих вариантов следует, что Земля столкнулась, по-видимому, не с астероидом из камня или железа, как предполагалось, а с кометой, ядро которой состояло из снега (рыхлого или слежавшегося) либо из смеси льда с песком. Последняя представляется пока наиболее вероятным материалом ядра, однако в любом случае прочность его неизвестна, хотя априори ясно, что у смеси льда с песком она близка к прочности льда ($K_{IC}^2 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$, см. п. 4.1.2), а у снега – намного меньше, вопрос только – насколько. Поэтому для расчетов фрагментации МКТ в первом приближении принимается ядро из смеси льда с песком (вариант 4) с трещиностойкостью как у льда, а ядра из снега (варианты 1–3), трещиностойкость которых неизвестна, не рассматриваются. Однако главная причина исключения снежных ядер из расчетов состоит в том, что снег – пористое тело, что для нашей модели принципиально недопустимо: для нее подходят только непористые тела (см. гл.1).*

Результаты расчетов фрагментации МКТ из смеси льда с песком (вариант 4) приведены в табл. 4.5 и показывают, что для этого типа МКТ и начальной скорости, т. е. при $\rho_b \approx 1700 \text{ кг/м}^3$ и $V_0 = 30 \text{ км/с}$:

1. Фрагментация была бы близка к лавинной, так как, несмотря на дискретный характер, акты фрагментации, числом до 64, были бы частыми и на относительно коротком участке траектории, т. е. через $\approx 1,4\text{--}4,3 \text{ км}$, что составило бы $\approx 2\text{--}6 \%$ от пути при фрагментации ($\approx 74 \text{ км}$), который, в свою очередь, составил бы $\approx 50 \%$ от всего пути в атмосфере. При этом, по аналогии с Тунгусским явлением, для расчетов рассеяния нет оснований, так как за краткостью времени между актами фрагментации фрагменты не могли бы разлететься на сколько-нибудь значительное расстояние и, по существу, остались бы в газовом «мешке» за фронтом УВ.

*Ниже (см. с. 127) показано, что расчеты распада ядер из снега не нужны.

Таблица 4.5

Результаты расчетов фрагментации Чиккулубовского астероида из смеси льда с песком

$$(D_0 = 10 \text{ км}, \alpha = 40^\circ, \rho_b = 1700 \text{ кг/м}^3, K_{IC}^2 = 1,6 \cdot 10^7 \text{ Па}^2 \cdot \text{м})$$

z_1 , км	V_1 , км/с	n	x_2, \dots, x_n , км	z_n , км	V_n , км/с	δU_n , %	$(z_{\max})_n$, км	m_n	D_n , м	z_{loss} , км	δU_{imp} , %
Вариант 4 (лед+песок, $M_0 = 0,9 \cdot 10^{12}$ т, $V_0 = 30$ км/с, $U_0 \approx 4 \cdot 10^{23}$ Дж)											
127,6	30,0	64	1,4...4,3	65,9	24,2	35,04	65,9	$1,84 \cdot 10^{19}$	0,004	≈ 59	≈ 0
Вариант 4.1 (лед+песок, $M_0 = 0,9 \cdot 10^{12}$ т, $V_0 = 70$ км/с)											
141,1	70,0	69	1,4...3,5	75,6	59,0	28,9	75,1	$5,90 \cdot 10^{20}$	0,001	≈ 44	≈ 0
Вариант 4.2 (лед+песок, $M_0 = 0,9 \cdot 10^{12}$ т, $V_0 = 140$ км/с)											
152,2	140,0	73	1,4...5,5	81,4	106,8	41,8	82,5	$9,44 \cdot 10^{21}$	0,0005	≈ 51	≈ 0
Вариант 4.3 (лед+песок, $M_0 = 0,9 \cdot 10^{12}$ т, $V_0 = 227,4$ км/с)											
160,0	227,4	75	1,4...2,7	89,7	201,7	21,3	86,2	$3,78 \cdot 10^{22}$	0,0003	≈ 54	≈ 0

2. Фрагментация произошла бы в самых верхних слоях атмосферы, за пределами стратосферы, так как началась бы на высоте ≈ 130 км (термосфера) и закончилась на ≈ 70 км (мезосфера). При этом потерялось бы $\approx 35\%$ энергии, и фрагменты измельчились до $\approx 10^{-3}$ м, после чего потеряли бы скорость на значительной высоте ≈ 60 км (мезосфера). Практически это уже метеорные частицы, и достичь поверхности Земли они не могли бы вследствие абляции (нами не учитывалась), интенсивность которой, как известно, резко возрастает с уменьшением фрагментов.

Здесь уместно вспомнить о телах из снега (варианты 1–3). Их расчеты, по существу, и не нужны, так как ясно, что, будучи существенно более рыхлыми, чем рассмотренная смесь льда с песком, они рассеялись бы еще выше, возможно, в термосфере, т. е. выше 80 км.

Поскольку, как известно, астероид все-таки достиг Земли, значит, его энергия вторжения в атмосферу была значительно большей, чем использованные в расчетах $4 \cdot 10^{22}$ или $4 \cdot 10^{23}$ Дж. Ведь уже очевидно, что эти оценки относятся не к U_0 , а к U_{imp} – энергии астероида при ударе о Землю. Но расчеты показали, что при этих значениях U_{imp} , ранее принятых за начальные, тело теряет в атмосфере практически всю энергию. Значит, следовало принять U_0 значительно большей, чем вышеуказанные значения U_{imp} , $4 \cdot 10^{22}$ или $4 \cdot 10^{23}$ Дж, а чтобы эффективно увеличить U_{imp} до U_0 , целесообразно принять вариант тела из смеси льда с песком (табл. 4.5, вариант 4) и повысить его скорость V_0 , например, вдвое (вариант 4.1), втрое (вариант 4.2) и вообще насколько возможно. Кстати, расчеты показали, что здесь возможный максимум скорости составляет всего лишь $V_0 = 227,4$ км/с (вариант 4.3)*. Однако и при этих гипотетических, практически не реализуемых скоростях радикально усилить атаку ас-

*При $V_0 > 227,4$ км/с решение уравнения фрагментации МКТ (2.9) практически невозможно, так как $B_1/V_0^4 \rightarrow 0$.

тероида, очевидно, не удастся: по-прежнему все происходит слишком высоко – его фрагментация заканчивается на $\approx 80\text{--}90$ км, и фрагменты теряют скорость еще в стратосфере (на высотах $\approx 40\text{--}50$ км).

Таким образом, результаты, полученные в рамках данной модели распада МКТ и при использованных исходных данных, показывают, что астероид из снега или смеси песка со льдом не мог бы столкнуться с Землей, так как рассеялся бы на высоте не ниже мезосферы. Достичь поверхности Земли могла только УВ от «взрыва» тела, однако необходимый для этого максимум интенсивности тормозного энерговыделения достигался бы на огромных высотах – $(z_{\max})_n > 60$ км. При этом мощности УВ вряд ли хватило бы, чтобы привести к образованию столь грандиозного ударного кратера, как Чикскулубский, хотя катастрофа типа вышеописанной, но, несомненно, в меньших масштабах могла бы произойти.

Итак, астероид мог быть только из более плотного материала, чем лед, например, из камня: гранита (табл. 4.6, варианты 5.1 и 5.2) или горной породы (варианты 6.1 и 6.2), или железа (варианты 7.1 и 7.2), кстати, выше упоминалось о находке в кратере следов никельмагнетита). Рассмотрим эти варианты, приняв для астероида $D_0 = 10$ км и энергию удара, U_{imp} , $4 \cdot 10^{22}$ или $4 \cdot 10^{23}$ Дж, как наиболее надежные данные, причем, естественно, будем считать, что энергия вторжения МКТ в атмосферу $U_0 > U_{imp}$. Пренебрегая абляцией тела, приходим к вариантам, приведенным в табл. 4.6.

Результаты дальнейших расчетов даны в табл. 4.7, где $t_{fr} =$

$$= \sum_{k=2}^n t_k - \text{время фрагментации тела, } t_k \approx 2l_k / (V_{k-1} + V_k) - \text{время между актами фрагментации. Эти результаты показывают следующее.}$$

1. Все варианты с каменным астероидом отпадают, так как его начальные скорости V_0 , использованные в широком диапазоне значений, не только не позволяют достичь требуемой энергии удара о Землю V_{imp} (табл. 4.7, варианты 5.1 и 6.1), но либо, при разме-

рах $D_n \approx 10^{-2}$ м, теряют скорость на значительной высоте (≈ 20 км), либо, при $D_n \approx 10^{-1}$ м, достигают грунта с ничтожными скоростями. Кстати, с увеличением V_0 в рассмотренных вариантах происходит уменьшение V_{imp} , что, на первый взгляд, странно, однако становится понятным, если учесть, что при этом возрастают количество актов фрагментации и число фрагментов, размеры которых соответственно уменьшаются, а интенсивность их АД торможения резко возрастает. По этой причине и варианты 5.2 и 6.2 (табл. 4.6), очевидно, неосуществимы. Соответственно, несостоятельны и оценки энергии взрыва каменного астероида $\approx 4 \cdot 10^{23}$ Дж, а также скорости 30 и 70 км/с, с которыми якобы этот астероид мог столкнуться с Землей (по расчетам, они недостижимы).

Таблица 4.6

Вероятные параметры вариантов Чикскулубского астероида с $D_0 = 10$ км, состоящего из камня или железа

Материал	$M_0, \text{т}$	Вариант	$U_{imp}, \text{Дж}$	$V_{imp}, \text{км/с}$
Гранит ($\rho_b = 2700 \text{ кг/м}^3$, $K_{IC}^2 = 9 \cdot 10^{11} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$)	$\approx 1,4 \cdot 10^{12}$	5.1	$4 \cdot 10^{22}$	$\approx 7,5$
		5.2	$4 \cdot 10^{23}$	$\approx 23,8$
Горная порода ($\rho_b = 3500 \text{ кг/м}^3$, $K_{IC}^2 = 10^{12} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$)	$\approx 1,8 \cdot 10^{12}$	6.1	$4 \cdot 10^{22}$	$\approx 6,6$
		6.2	$4 \cdot 10^{23}$	$\approx 20,9$
Железо ($\rho_b = 7800 \text{ кг/м}^3$, $K_{IC}^2 = 10^{15} \text{ Па}^2 \cdot \text{м}$)	$\approx 4,1 \cdot 10^{12}$	7.1	$4 \cdot 10^{22} - 4 \cdot 10^{23}$	$\approx 4,4 - 14,0$
		7.2	$4 \cdot 10^{23}$	$\approx 14,0$

2. Этот вывод справедлив и для варианта 7.2 (табл. 4.7) (при скоростях $V_0 = 50-70$ км/с). Для железного астероида подходит лишь вариант 7.1, в котором расчетные уровни U_{imp} попадают

в тот самый «катастрофический» интервал $\square 4 \cdot 10^{22} - 4 \cdot 10^{23}$ Дж. Это, очевидно, возможно при $V_0 = 8-30$ км/с, причем максимум U_{imp} (10^{23} Дж) может реализоваться только при $V_0 = 11$ км/с. Динамику фрагментации такого астероида, например, при $V_0 = 8$ км/с, можно проследить по данным табл. 4.8, полученным в результате численных расчетов по методике, изложенной в гл. 3. В расчетах, учитывая слабое изменение скорости астероида, были использованы формулы (3.23) и (3.24) для разностной схемы, основанной на элементе $\delta\xi_s$ траекторного перемещения l_k между $(k-1)$ -м и k -м актами фрагментации (было принято $\delta\xi_s \square 10^{-2} l_k$). В этом случае решалась система уравнений в конечных разностях для сферы (3.32).

Итак, согласно расчетам, фрагментация астероида была довольно интенсивной: она началась на высоте ≈ 35 км, совершалась 34 раза, через каждые $l_k \approx 1,4-2,5$ км на протяжении ≈ 102 км пути*. На большей его части (вплоть до 31 акта фрагментации) образующиеся фрагменты практически не успевали повернуться, как уже совершался очередной акт фрагментации. При этом, хотя углы и скорости поворота (φ_k и $\dot{\varphi}_k$) были мизерными, они постепенно возрастали (по причине измельчения фрагментов, см. гл. 2, п. 3.1.1.2), и астероид становился все более рыхлым, так как общий объем шара из раздвигавшихся фрагментов соответственно увеличивался. На заключительной стадии фрагментации (после 32-го акта) этот процесс ускорился, так как фрагменты стали разлетаться, хоть и не так уж далеко. Таким образом, к концу фрагментации, когда до удара о планету оставалось каких-нибудь ≈ 2 км полета, астероид «распух», и его диаметр как бы увеличился примерно вдвое ($2R_{\eta n}/D_0 \approx 1,85$). В процессе фрагментации, длившейся энергия –

*Заметим, что и при других, больших значениях V_0 , фрагментация была бы не менее интенсивной, только происходила бы она в более высоких слоях атмосферы и тем выше, чем больше V_0 , да и количество актов фрагментации соответственно возрастало бы.

Таблица 4.7

Результаты расчетов фрагментации Чиккулубского астероида из камня или железа

$$(U_{imp} = 4 \cdot 10^{22} - 4 \cdot 10^{23} \text{ Дж}, D_0 = 10 \text{ км}, \alpha = 40^\circ)$$

V_0 , км/с	z_1 , км	V_1 , км/с	n	ξ_2, \dots, ξ_{n1} , км	z_n , км	V_n , км/с	δU_n , %	t_{fr} , с	$(z_{max})_n$, км	m_n	D_n , м	z_{loss} , км	V_{imp} , км/с	U_{imp} , Дж
Вариант 5.1 (гранит, $M_0 \approx 1,4 \cdot 10^{12}$ т)														
8	62,7	8,0	42	1,4...4,9	20,9	6,3	38,6	8,3	21,5	$4,4 \cdot 10^{12}$	0,6104	≈ 0	0,007	$3,4 \cdot 10^{16}$
11	67,8	11,0	43	1,4...2,6	27,1	9,8	20,4	5,8	23,4	$8,8 \cdot 10^{12}$	0,4844	≈ 0	0,001	$7,0 \cdot 10^{14}$
100	103,1	100,0	56	1,4...2,9	50,1	87,3	23,7	0,8	47,4	$7,2 \cdot 10^{16}$	0,0240	≈ 16	≈ 0	≈ 0
Вариант 6.1 (горная порода, $M_0 \approx 1,8 \cdot 10^{12}$ т)														
8	62,3	8,0	42	1,4...2,9	22,2	7,0	23,4	7,9	19,4	$4,4 \cdot 10^{12}$	0,6104	≈ 0	0,034	10^{18}
11	67,4	11,0	44	1,4...3,1	25,2	9,5	26,0	6,0	23,1	$1,8 \cdot 10^{13}$	0,3845	≈ 0	0,002	$3,6 \cdot 10^{15}$
100	102,7	100,0	57	1,4...3,8	47,9	85,6	31,7	0,9	47,2	$1,4 \cdot 10^{17}$	0,0190	≈ 16	≈ 0	≈ 0

Окончание табл. 4.7

V_0 , км/с	τ_1 , км	V_1 , км/с	n	ξ_2, \dots, ξ_n , км	z_n , км	V_n , км/с	δU_n , %	t_{fr} , с	$(\tau_{max})_n$, км	m_n	D_n , м	z_{loss} , км	V_{imp} , км/с	U_{imp} , Дж
Вариант 7.1 (железо, $M_0 \approx 4,1 \cdot 10^{12}$ т)														
8	34,6	8,0	34	1,4...2,5	2,4	7,2	19,3	6,3	—	$1,7 \cdot 10^{10}$	3,8755	—	6,5	$8,5 \cdot 10^{22}$
11	39,7	11,0	36	1,4...2,7	5,5	9,8	21,1	4,9	1,9	$6,9 \cdot 10^{10}$	2,4414	—	7,1	10^{23}
15	44,7	15,0	38	1,4...2,9	8,3	13,1	23,8	3,8	5,6	$2,7 \cdot 10^{11}$	1,5380	—	6,8	$9,5 \cdot 10^{22}$
30	55,8	30,0	42	1,4...2,9	15,7	26,2	23,8	2,1	13,0	$4,4 \cdot 10^{12}$	0,6104	—	4,5	$4,2 \cdot 10^{22}$
Вариант 7.2 (железо, $M_0 \approx 4,1 \cdot 10^{12}$ т)														
50	64,0	50,0	45	1,4...3,0	21,0	43,4	24,6	1,3	18,6	$3,5 \cdot 10^{13}$	0,3052	—	0,383	$3,0 \cdot 10^{20}$
70	69,3	70,0	47	1,4...3,1	24,5	60,4	25,5	1,0	22,3	$1,4 \cdot 10^{14}$	0,1922	—	0,027	$1,5 \cdot 10^{18}$

Таблица 4.8

Вариант фрагментации Чиккулубского астероида (железо, $M_0 \approx 4,1 \cdot 10^{12}$ т, $V_0 = 8$ км/с)

k	$z_k, \text{ км}$	$V_k, \text{ м/с}$	$D_k, \text{ м}$	m_k	$\delta U_k, \%$	$l_k, \text{ км}$	$t_k, \text{ с}$	$\varphi_k, \text{ рад}$	$\dot{\varphi}_k, 1/\text{с}$	$V'_{\text{пнк}}, \text{ м/с}$	$R_{\text{пнк}}, \text{ км}$
1	34,6	8000,0	7937,005	2	$\approx 0,00$	—	—	$3,120 \cdot 10^{-8}$	$3,625 \cdot 10^{-7}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$	1,875
2	33,7	8000,0	6299,606	4,0	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$5,560 \cdot 10^{-8}$	$6,460 \cdot 10^{-7}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	3,363
3	32,8	8000,0	5000,000	8,0	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$9,904 \cdot 10^{-8}$	$1,151 \cdot 10^{-6}$	$4,80 \cdot 10^{-3}$	4,544
4	31,9	8000,0	3968,503	16,0	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$1,762 \cdot 10^{-7}$	$2,049 \cdot 10^{-6}$	$7,02 \cdot 10^{-3}$	5,482
5	31,0	8000,0	3149,803	32,0	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$3,141 \cdot 10^{-7}$	$3,652 \cdot 10^{-6}$	$8,87 \cdot 10^{-3}$	6,226
6	30,1	8000,0	2500,000	64,0	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$5,594 \cdot 10^{-7}$	$6,503 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	6,817
7	29,1	7999,9	1984,251	$1,28 \cdot 10^2$	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$9,973 \cdot 10^{-7}$	$1,159 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$	7,285
8	28,2	7999,9	1574,901	$2,56 \cdot 10^2$	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$1,776 \cdot 10^{-6}$	$2,065 \cdot 10^{-5}$	$2,81 \cdot 10^{-2}$	7,657
9	27,3	7999,9	1250,000	$5,12 \cdot 10^2$	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$3,166 \cdot 10^{-6}$	$3,680 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-2}$	7,953
10	26,3	7999,9	992,126	$1,02 \cdot 10^3$	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$5,644 \cdot 10^{-6}$	$6,561 \cdot 10^{-5}$	$5,75 \cdot 10^{-2}$	8,187
11	25,4	7999,8	787,451	$2,05 \cdot 10^3$	$\approx 0,00$	1,438	0,180	$1,005 \cdot 10^{-5}$	$1,168 \cdot 10^{-4}$	$8,17 \cdot 10^{-2}$	8,373
12	24,5	7999,7	625,000	$4,10 \cdot 10^3$	0,01	1,438	0,180	$1,792 \cdot 10^{-5}$	$2,083 \cdot 10^{-4}$	0,116	8,521
13	23,5	7999,6	496,063	$8,19 \cdot 10^3$	0,01	1,438	0,180	$3,213 \cdot 10^{-5}$	$2,166 \cdot 10^{-4}$	0,164	8,638
14	22,6	7999,4	393,725	$1,64 \cdot 10^4$	0,01	1,438	0,180	$5,689 \cdot 10^{-5}$	$6,612 \cdot 10^{-4}$	0,232	8,731
15	21,7	7999,2	312,500	$3,28 \cdot 10^4$	0,02	1,439	0,180	$1,016 \cdot 10^{-4}$	$1,180 \cdot 10^{-3}$	0,328	8,805
16	20,8	7998,9	248,031	$6,55 \cdot 10^4$	0,03	1,439	0,180	$1,809 \cdot 10^{-4}$	$2,101 \cdot 10^{-3}$	0,464	8,864
17	19,9	7998,4	196,863	$1,31 \cdot 10^5$	0,04	1,439	0,180	$3,229 \cdot 10^{-4}$	$3,749 \cdot 10^{-3}$	0,657	8,910

Продолжение табл. 4.8

k	$z_k, \text{ км}$	$V_k, \text{ м/с}$	$D_k, \text{ м}$	m_k	$\delta U_k, \%$	$l_k, \text{ км}$	$t_k, \text{ с}$	$\varphi_k, \text{ рад}$	$\dot{\varphi}_k, 1/\text{с}$	$V_{\text{нпк}}, \text{ м/с}$	$R_{\text{нпк}}, \text{ км}$
18	18,9	7997,8	156,250	$2,62 \cdot 10^5$	0,05	1,441	0,180	$5,766 \cdot 10^{-4}$	$6,689 \cdot 10^{-3}$	0,930	8,947
19	18,0	7996,9	124,016	$5,24 \cdot 10^5$	0,08	1,441	0,180	$1,031 \cdot 10^{-3}$	$1,195 \cdot 10^{-2}$	1,318	8,977
20	17,1	7995,6	98,431	$1,05 \cdot 10^6$	0,11	1,442	0,180	$1,844 \cdot 10^{-3}$	$2,136 \cdot 10^{-2}$	1,867	9,000
21	16,1	7993,7	78,125	$2,10 \cdot 10^6$	0,16	1,444	0,181	$3,304 \cdot 10^{-3}$	$824 \cdot 10^{-2}$	2,650	9,019
22	15,2	7991,1	62,008	$4,19 \cdot 10^6$	0,22	1,446	0,181	$5,933 \cdot 10^{-3}$	$6,863 \cdot 10^{-2}$	3,765	9,035
23	14,3	7987,4	49,216	$8,39 \cdot 10^6$	0,31	1,449	0,181	$1,072 \cdot 10^{-2}$	0,124	5,370	9,047
24	13,3	7982,2	39,063	$1,68 \cdot 10^7$	0,44	1,454	0,182	$1,950 \cdot 10^{-2}$	0,226	7,694	9,058
25	12,4	7974,7	31,004	$3,36 \cdot 10^6$	0,63	1,461	0,183	$3,592 \cdot 10^{-2}$	0,417	11,12	9,068
26	11,5	7964,1	24,608	$6,71 \cdot 10^6$	0,90	1,471	0,185	$6,740 \cdot 10^{-2}$	0,792	16,32	9,076
27	10,5	7948,9	19,531	$1,34 \cdot 10^8$	1,27	1,485	0,187	0,131	1,587	24,59	9,086
28	9,5	7927,0	15,502	$2,68 \cdot 10^8$	1,82	1,506	0,190	0,275	3,597	38,97	9,097
29	8,6	7895,3	12,304	$5,37 \cdot 10^8$	2,60	1,537	0,195	0,298	3,830	50,19	9,111
30	7,5	7848,9	9,766	$1,074 \cdot 10^9$	3,74	1,585	0,202	0,348	4,352	60,91	9,128
31	6,5	7779,7	7,751	$2,147 \cdot 10^9$	5,43	1,658	0,212	0,427	5,219	72,05	9,150
32	5,3	7673,5	6,152	$4,295 \cdot 10^9$	8,00	1,780	0,230				

Окончание табл. 4.8

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	m_k	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	φ_k , рад	ϕ_k , 1/с	$V_{\eta k}$, м/с	$R_{\eta k}$, км
Поворот 32		7555,5			10,84	1,963*	0,258*	0,654*	8,220*	85,17	
До следующего акта фрагментации											
33	4,0	7501,30	4,883	$8,590 \cdot 10^9$	12,08	2,003	0,263				9,178
Поворот 33		7389,3			14,68	1,853*	0,249*	0,688*	8,642*	96,38	
До следующего акта фрагментации											
34	2,4	7186,30	3,876	$1,718 \cdot 10^{10}$	19,31	2,506	0,339				
Поворот 34		7081,9			21,63	1,760*	0,247*	0,693*	7,764*	104,40	
Фрагментация астероида завершена				$\Sigma =$	21,63	101,998	12,900				9,240
При ударе о планету											
-	0,00	6676,1	3,876	-	30,36	1,974	0,287	-	-	D_{imp} , км	18,54

*Критическое значение параметра.

до $\approx 22\%$ кинетической энергии астероида, т. е. до $\approx 2,84 \cdot 10^{22}$ Дж, что эквивалентно энергии взрыва $\approx 3,35 \cdot 10^8$ (335 миллионов) бомб Хиросимы! Это уже само по себе было бы неопишваемым бедствием для обитателей планеты, но, увы, не последним: до худшего оставалось около 0,3 с.

И вот на голубую мирную планету, теплую и ласковую обитель жизни, быть может, единственную в мироздании, с немыслимой скоростью и ужасающим грохотом обрушился неистовый злобный и беспощадный САТАНА. Он был в облике громадного, диаметром около 20 км, огненного шара, сиявшего «ярче тысячи солнц» и заполненного ≈ 17 миллиардами ≈ 4 -метровых железных глыб, кувывкавшихся в его раскаленной газовой утробе. Тут, как мы уж знаем, и произошел тот невообразимо чудовищной силы взрыв, при котором выделились оставшиеся $\approx 70\%$ энергии астероида, т. е. до $\approx 9,14 \cdot 10^{22}$ Дж. С этим мог бы сравниться только взрыв $\approx 1,1 \cdot 10^9$ ($\approx 1,1$ миллиарда) бомб Хиросимы!

Между прочим, если бы эта «бомба» ударила в сушу, то, согласно (4.1), возник бы кратер диаметром ≈ 90 км, что примерно одного порядка с фактическими размерами (150–300 км, как мы знаем). Но удар пришелся в залив, хотя и недалеко от берега, и вода вполне могла существенно расширить зону воздействия на грунт (за счет гидроудара) и, соответственно, увеличить диаметр кратера, да и размывать его за столько-то лет до известных ныне размеров. Кстати, по этой формуле, для образования на суше кратера диаметром 150–300 км потребовалась бы взрывная энергия от $\approx 2,5 \cdot 10^{25}$ до $2,6 \cdot 10^{26}$ Дж, т. е. на 3–4 порядка больше принятой U_{imp} .

Таким образом, по расчетам распада МКТ в рамках нашей модели, если действительно 65 млн. лет назад в Землю врезался астероид, то он мог быть только из железа (с примесью никеля), диаметр его был 10 км, скорость вторжения в атмосферу – от 8 до 30 км/с и скорость удара по планете – от 4,5 до 7,1 км/с!

Так, по-видимому, и свершилась 65 млн. лет назад на Земле та небывалая жуть, и наступил ад кромешный, и пала ночь непро-

глядная, а вот день не наступил ни назавтра, ни через неделю, ни через месяц... А когда через годы, быть может, даже через десятки лет, он все-таки наступил, в истории жизни на Земле уже начался крутой поворот. И, дай бог, последний.

В заключение заметим, что захватывающая астероидная теория вымирания не нашла всеобщего признания [23]. Ее критики считают, что, во-первых, Земля подозрительно быстро оправилась от космической катастрофы. Удар такого (10–12-километрового) астероида оставил бы на планете гораздо меньше живого, а выжившим потребовалось бы больше времени для заселения опустевших континентов. Теория Алваресов не объясняет и временных рамок вымирания. «Ударная зима» погубила бы динозавров за считанные десятилетия, максимум – века. Однако ископаемые остатки доказывают, что эти рептилии исчезали с лица Земли в течение примерно 140 тыс. лет. Во-вторых, Алваресы допускали лишь внеземное происхождение высоких концентраций иридия в земной коре. Это представляется логичным, учитывая редкость в ней этого металла, однако возможен и другой источник – глубинный. Иридия мало в земной коре, но зато много в мантии планеты. Так, согласно недавним измерениям, его содержание в выбросах действующего гавайского вулкана Килауэа больше, чем в любом известном метеорите, и соответствует содержанию в той самой «иридиевой» глине из Губбии, давшей толчок теории Алваресов.

Ну, что ж, вполне резонные и обоснованные возражения, надо признать. И все-таки жаль расставаться с теорией Алваресов, такой красивой! По-видимому, истина, как всегда, посередине. Например, возможно и такое предположение: да, Чикскулубский астероид мог и не привести сразу к гибели динозавров, но вполне мог спровоцировать и ускорить их вырождение и вымирание в будущем.

Однако в любом случае не стоит сожалеть: ведь не будь этой катастрофы, очень может быть, что не было бы и нас с Вами, уважаемый читатель. Помните, как у фантаста Рэя Брэдбери в рассказе «И грянул гром» один незадачливый путешественник во времени забрался в эпоху динозавров на охоту и, испугавшись тираннозавра, оступился и нечаянно раздавил бабочку, а вернувшись в современность, с ужасом узнал, к чему это привело: к власти пришел «плохой» президент, хотя до путешествия почти стопроцентные шансы

были у «хорошего» претендента на этот пост. Так и с Чикскулубской катастрофой: не будь ее, очень может быть, что и до сего дня хладнокровные динозавры всех мастей спокойно кушали бы растения или поедали друг друга, а теплокровные приматы (мы-то ведь родом от них) так и не появились бы. Воистину, нет худа без добра!

4.1.4. Аризонский «Огненный Бог»*

На северо-востоке штата Аризона, в пустынной местности неподалеку от Каньона Дьявола, между городами Флагстафф и Уинслоу находится одно из «чудес света»: огромная чашеобразная воронка на поверхности Земли – Аризонский метеоритный кратер (рис. 4.5 на цветной вкладке). Его размеры впечатляют: диаметр 1,2–1,25 км и глубина 174–180 м. Издали, с плоской поверхности пустыни, внешние склоны кратера (их высота всего 45 м) кажутся небольшой холмистой грядой, поэтому европейцы обнаружили за ними зияющую «рану» в теле планеты только в 1871 г. Однако обитавшие здесь индейские племена давно знали о ней, так как, по их преданиям, это – след Огненного Бога, когда-то посетившего их предков.

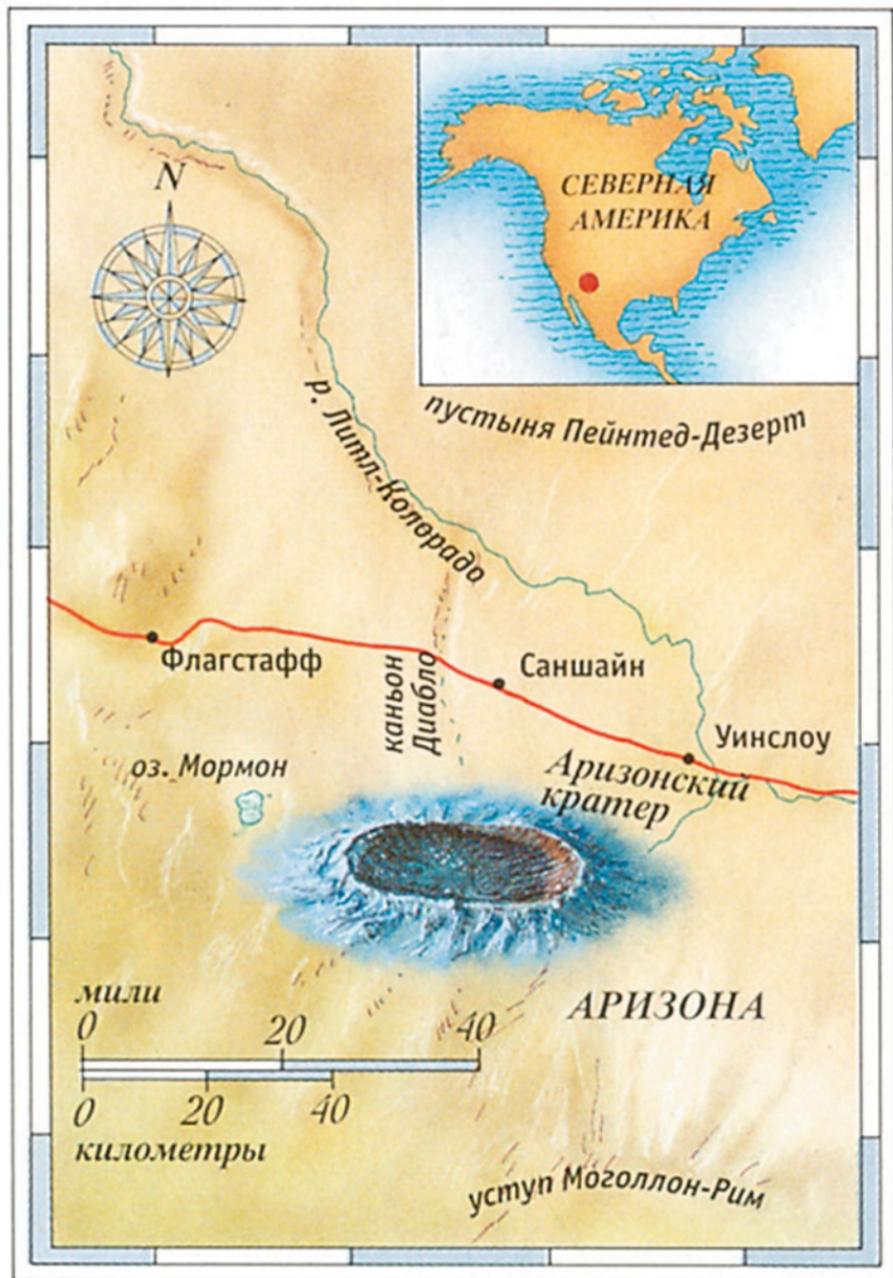
Вначале полагали, что кратер вулканического происхождения, но в 1890 г. среди обломков, разбросанных вокруг него, было обнаружено множество железных фрагментов. И хотя находке в тот момент особенного значения не придали, некоторые ученые стали склоняться к мысли, что подобная внушительная отметина на лике Земли могла быть и результатом удара телом внеземного происхождения. По разным оценкам, это случилось примерно 30–50 тыс. лет назад.

Изучив этот район в 1902 г., Дэниэл Бэрринджер, горный инженер из Филадельфии, настолько уверовал в существование огромного железосодержащего метеорита, что купил в 1906 г. этот участок и приступил к бурению. Поскольку кратер имеет почти правильную круглую форму он предполагал, что создавшее его тело должно быть погребено в центре. Однако позже он установил, что, если выпустить пулю в мягкую почву даже под острым углом к поверхности, то отверстие все равно получается круглым.

*Материал публикуется впервые.



Рис. 4.5. Аризонский кратер (кратер Бэрринджера) [27]



Карта-схема зоны Аризонского кратера [28]

Это открытие, а также превышение юго-восточной стены кратера над остальными его краями более чем на 30 м, натолкнуло его на мысль, что метеороид падал с северо-запада под острым углом и, следовательно, должен находиться в юго-восточной стороне кратера. Здесь и началось бурение. На глубине 305 м было обнаружено все возрастающее число железных и железоникелевых фрагментов. На глубине 420 м продвижение бура полностью прекратилось – очевидно, бур достиг твердого метеоритного вещества (по этой глубине можно оценить угол наклона траектории МКТ к горизонту как $\alpha \approx 30^\circ$). Впоследствии (1929 г.), в связи с возникшими финансовыми затруднениями, работы были прекращены, но к тому времени было уже почти ясно, что кратер действительно образован ударом крупного метеороида.

При его ударе о грунт в атмосферу было выброшено ~ 100 млн. т раздробленных в пыль пород, капли расплавленного металла от метеороида разлетелись по площади 260 км². Фрагменты в основной массе были не крупнее гальки, хотя отдельные достигали 630 кг. Выброшенные из кратера породы были смесью песчаника с известняком – остатками богатых окаменелостями пород, составлявших дно доисторического озера, некогда существовавшего в этом регионе. Теперь их толстый слой, именуемый брекчией, в форме линзы покрывает дно кратера.

В 30-х гг. на бурение сквозь брекчию до дна снова были выделены средства. На глубине до 260 м показались следы никелистого железа, но ниже этого уровня породы оказались нетронутыми. Был сделан вывод, что остатки метеороида залегают под южной кромкой кратера, но составляют не более 10 % от основных пород. Основная же масса метеороида была распылена при ударе или рассеяна в виде железоникелевых фрагментов.

В 1960 г. в чаше кратера обнаружили следы двух редких форм кремнезема – коэзита и стишовита. Их получают также искусственно в условиях высоких давлений и температур. Однако хотя в природе стишовит и может формироваться под высоким давлением в глубинах земной коры, но, выходя на поверхность, он превращается в кварц. Присутствие этих минералов в естественной форме в районе кратера служит неоспоримым доказательством мощного

столкновения. Так предположение Бэрринджера о метеоритной природе кратера, носящего теперь его имя, полностью подтвердилось.

Первое время размеры этого космического тела и скорость удара о грунт были предметом домыслов. Так, в 30-х гг. ученые оценивали его массу в 14 млн. т, а диаметр – в 122 м [27]. Теперь это кажется странным, ведь в данном случае плотность тела составляла бы $\approx 15 \text{ г/см}^3$, т. е. нечто среднее между, например, плотностью свинца и золота или урана, что вряд ли реально, тем более, что фрагментов из подобных веществ не обнаружено. Позднее попытки оценить параметры тела и его движения были продолжены. Так, по одним современным оценкам, диаметр и вес тела составляли 30 м и 150 тыс. т [25], что тоже нереально, так как в этом случае плотность метеороида составляла бы $\approx 10600 \text{ кг/м}^3$, т. е. он состоял бы не из железа, а, скажем, из серебра. По другим оценкам, вес его достигал 70 тыс. т, а размер 25–30 м [27]. Это уже близко к взаимному соответствию, так как при данной массе и плотности железа диаметр такого тела был бы равен $\approx 26 \text{ м}$. Как сообщается, чтобы образовать столь внушительный кратер, метеороид «пробил» атмосферу со скоростью 69000 км/ч ($\approx 19 \text{ км/с}$) или около того. Сила его удара о Землю равнялась силе взрыва 500 тыс. т ВВ, что якобы в 40 раз мощнее взрыва бомбы Хиросимы. А вот это уже неправда: во-первых, взрыв 500 тыс. т тротила (по-видимому, он имеется в виду, так как это общепринятый стандарт) эквивалентен взрыву 25, а не 40 бомб Хиросимы (ее эквивалент, как известно, 20 тыс. т ТНТ). Во-вторых, при указанных массе и скорости метеороида энергия удара была бы эквивалентна взрыву $\approx 3 \text{ млн. т ТНТ}$, а не 500 тыс. т, т. е. в 6 раз больше.

В [28] говорится об ударе железоникелевой глыбы диаметром около 40 м и массой более 300 тыс. т, летевшей со скоростью 72 тыс. км/ч (20 км/с). При этом взрыв по мощности был якобы эквивалентен взрыву 10^3 бомб Хиросимы (значит, 20 млн. т ТНТ). Здесь масса тела и мощность взрыва несколько преувеличены: при плотности железа и указанных диаметре и скорости глыбы они не могли превышать, соответственно, 261 тыс. т и ≈ 710 бомб Хиросимы ($\approx 14,2 \text{ млн. т ТНТ}$).

В [29] сообщается только о скорости метеороида в 11 км/с. Здесь неизвестны ни его размер (и, соответственно, масса), ни энергия удара. Попробуем хотя бы приблизительно восполнить этот пробел, используя диаметр кратера и формулу (4.1), откуда следует: $U_{imp}^* = U_{exp}, \approx \left(10^5 D_{kr}, \text{ км/1,96}\right)^{3,4} \approx 1,89 \cdot 10^{16}$ Дж (это эквивалентно энергии взрыва $\approx 4,46$ млн. т ТНТ или ≈ 223 бомбам Хиросимы). Значит, при $V_{imp} = 11$ км/с диаметр железного тела мог быть ≈ 43 м.

Подведем промежуточные итоги. Что касается вышеизложенного, то, кроме размеров кратера, лишь одно не вызывает сомнений – железный (точнее, железоникелевый) состав метеороида. Относительно же прочих данных, речь, по-видимому, может пока идти только о порядке их величин. Особенно это относится к массе, скорости и энергии удара, оценки которых (табл. 4.9) даны, конечно, на момент удара. Какие же из них наиболее вероятны?

Таблица 4.9

Вероятные параметры Аризонского метеороида (железо)

Вариант	D_0 , м	M_0 , т	V_{imp} , км/с	U_{imp}^* , Дж	Источник
Известные варианты					
1	≈ 26	$\approx 7,2 \cdot 10^4$	≈ 19	$\approx 1,26 \cdot 10^{16}$	[27]
2	≈ 40	$\approx 2,6 \cdot 10^5$	20	$\approx 5,20 \cdot 10^{16}$	[28]
3	≈ 43	$\approx 3,2 \cdot 10^5$	11	$\approx 1,89 \cdot 10^{16}$	[29]
Альтернативные варианты					
4	62	$\approx 9,7 \cdot 10^5$	$\approx 6,22$	$\approx 1,89 \cdot 10^{16}$	–
5	59	$\approx 8,4 \cdot 10^5$	$\approx 6,71$	$\approx 1,89 \cdot 10^{16}$	–

Результаты расчетов по данным табл. 4.9 в естественном предположении, что $V_{imp} < V_0$, приведены в табл. 4.10, откуда следует, что ни один из известных вариантов не подходит. В самом деле, взять хотя бы вариант 1: при соответствующих ему исходных данных расчетная скорость удара на порядок меньше, чем

Таблица 4.10

Результаты расчетов фрагментации Аризонского метеороида

(железо, $\alpha = 30^\circ$, $K_{IC} = 10^{15}$ Па²·м)

V_0 , км/с	z_1 , км	V_1 , км/с	n	ξ_2, \dots, ξ_n , км	z_n , км	V_n , км/с	$\frac{\delta U_n}{U_n}$, %	$\tau_{2,r}$, с	$(z_{\max})_n$, км	m_n	D_n , м	z_{loss} , км	V_{imp} , км/с
Известные варианты:													
Вариант 1 ($D_0 \approx 26$ м, $M_0 \approx 7,2 \cdot 10^4$ т, $V_{\text{imp}} \approx 19$ км/с, $U_{\text{imp}} \approx 1,26 \cdot 10^{16}$ Дж)													
30	32,0	29,96	16	1,9...5,5	14,7	24,2	34,9	35,4	—	$\approx 6,6 \cdot 10^4$	0,645	—	1,79
60	43,1	59,98	20	1,9...5,5	22,81	4,85	34,6	17,6	22,0	$\approx 1,05 \cdot 10^6$	0,256	—	0,03
Вариант 2 ($D_0 \approx 40$ м, $M_0 \approx 2,6 \cdot 10^5$ т, $V_{\text{imp}} \approx 20$ км/с, $U_{\text{imp}} \approx 5,2 \cdot 10^{16}$ Дж)													
30	33,7	29,98	18	1,9...7,8	13,3	22,37	44,4	23,0	—	$\approx 2,62 \cdot 10^5$	0,625	—	1,67
60	44,8	59,99	22	1,9...7,7	20,8	44,95	43,9	11,5	—	$\approx 4,19 \cdot 10^6$	0,248	—	0,03
Вариант 3 ($D_0 \approx 43$ м, $M_0 \approx 3,2 \cdot 10^5$ т, $V_{\text{imp}} \approx 11$ км/с, $U_{\text{imp}} \approx 1,9 \cdot 10^{16}$ Дж)													
15	22,9	14,96	14	1,9...4,6	8,0	12,56	29,9	43,0	—	$\approx 1,64 \cdot 10^4$	1,693	—	5,94
30	34,0	29,98	18	1,9...4,6	15,5	25,19	29,5	21,4	—	$\approx 2,62 \cdot 10^5$	0,672	—	1,97
Альтернативные варианты:													
Вариант 4 ($D_0 \approx 62$ м, $M_0 \approx 9,7 \cdot 10^5$ т, $V_{\text{imp}} \approx 6,22$ км/с, $U_{\text{imp}} \approx 1,9 \cdot 10^{16}$ Дж)													
8	14,2	7,96	12	1,9...4,8	1,1	6,62	31,4	56,6	0,25	$\approx 4,10 \cdot 10^3$	3,875	—	6,12
Вариант 5 ($D_0 \approx 59$ м, $M_0 \approx 8,4 \cdot 10^5$ т, $V_{\text{imp}} \approx 6,71$ км/с, $U_{\text{imp}} \approx 1,9 \cdot 10^{16}$ Дж)													
11	19,2	10,97	13	1,9...3,3	6,2	9,79	20,8	42,8	2,5	$\approx 8,19 \cdot 10^3$	2,927	—	6,76

предполагалось. Уменьшать принятую V_0 , очевидно, нецелесообразно (она и так недостаточна), а ее увеличение, например, в 2 или 3 раза (или, в принципе, в еще большее число раз), в надежде повысить V_{imp} , приводит к обратному эффекту. Это объясняется увеличением в этих случаях количества актов фрагментации, влекущем существенный рост количества фрагментов и, соответственно, резкое увеличение АДС на участке траектории после фрагментации. Аналогичные события происходят и в остальных известных вариантах 2 и 3.

Итак, очевидно, что все известные оценки возможных параметров Аризонского метеороида не могут привести к результатам, соответствующим фактам или хоть сколько-нибудь правдоподобным. Иными словами, эти оценки некорректны, так как, согласно расчетам, в исходных параметрах отсутствует взаимосвязь. Вот и получается, что метеороида с такими параметрами не могло быть. Но ведь он все-таки был – нельзя же игнорировать такой «железный» аргумент, как гигантский метеоритный кратер в Аризоне! Так какова же альтернатива?

А она существует, если наладить взаимосвязь между исходными параметрами. В самом деле, приняв в альтернативных вариантах за основу энергию удара $U_{imp}^* \approx 1,89 \cdot 10^{16}$ Дж, способную образовать кратер с аризонскими размерами, как в 3-м варианте, получим, что она реализуется, например, при $V_0 = 8$ км/с (вариант 4), если $D_0 \approx 62$ м, или при $V_0 = 11$ км/с (вариант 5), если $D_0 \approx 59$ м. И так далее, т. е. повышая скорость, необходимо уменьшать диаметр, но так, чтобы сохранялась принятая энергия удара (по крайней мере, близкая к реально возможной, разумеется).

Однако в любом случае поверхности планеты достигает раздробленное тело. Это видно по данным табл. 4.11 и 4.12, где в качестве примера приведены результаты расчета распада и рассеяния МКТ в вариантах 4 и 5. В самом деле, здесь углы поворота и угловые скорости фрагментов ϕ_k и $\dot{\phi}_k$ достигают критических значений при 7 последних актах фрагментации. При ударе о планету

Таблица 4.11

Результаты распада и рассеяния Аризонского метеороида в варианте 4 (табл. 4.9 и 4.10)

(железо, $D_0 \approx 62$ м, $M_0 \approx 9,7 \cdot 10^5$ т, $V_0 = 8$ км/с)

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	m_k	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	τ_k	φ_k , рад	$\dot{\varphi}_k$, 1/с	$\dot{V}_{\text{члк}}$, м/с	$R_{\text{члк}}$, км
1	14,2	7956,5	49,209	2,0	0,54	—	—	—	—	—	—	—
Поворот 1												
2	13,3	7949,7	39,058	4,0	0,63	1,876	0,236	57	0,031	0,283	8,66	0,013
Поворот 2												
3	12,3	7940,0	31,000	8,0	0,75	1,887	0,237	72	0,058	0,528	15,36	0,025
Поворот 3												
4	11,4	7926,2	24,605	16,0	0,92	1,904	0,240	91	0,109	1,028	21,01	0,038
Поворот 4												
5	10,4	7906,3	19,529	32,0	1,17	1,929	0,244	117	0,216	2,171	36,75	0,052
Поворот 5												
6	9,4	7877,6	15,500	64,0	1,53	1,965	0,249	151	0,477	5,697	62,19	0,071
Поворот 6												
До следующего акта фрагментации						1,656*	0,211*	—	0,687*	11,454*	86,32*	—
До следующего акта фрагментации						0,363	0,046	—	—	—	—	0,100
7	8,4	7835,7	12,302	$1,28 \cdot 10^2$	2,05	2,019	0,257	196	—	—	—	—
Поворот 7												
До следующего акта фрагментации						1,220*	0,156*	—	0,650*	14,295*	106,88*	—
До следующего акта фрагментации						0,883	0,113	—	—	—	—	0,142

Окончание таблицы 4.11

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	m_k	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	τ_k	φ_k , рад	$\dot{\varphi}_k$, 1/с	$\dot{V}_{\text{пнк}}$, м/с	$R_{\text{пнк}}$, км
8	7,4	7773,6	9,764	$2,56 \cdot 10^2$	2,83	2,103	0,269	259				
Поворот 8												
До следующего акта фрагментации												
9	6,3	7679,1	7,750	$5,12 \cdot 10^2$	4,01	2,240	0,289	241				0,201
Поворот 9												
До следующего акта фрагментации												
10	5,0	7528,5	6,151	$1,02 \cdot 10^3$	5,89	2,482	0,326	502				0,281
Поворот 10												
До следующего акта фрагментации												
11	3,5	7264,6	4,882	$2,05 \cdot 10^3$	9,19	2,990	0,404	790				0,403
Поворот 11												
До следующего акта фрагментации												
12	1,1	6623,8	3,875	$4,10 \cdot 10^3$	17,20	4,803	1,394	1753				
Поворот 12												
Фрагментация метеороида завершена												
				$\Sigma =$	17,20	22,669	4,182					0,922
При ударе в планету												
-	0,0	6122,9	3,875	-	-	1,965	0,309	-	-	-	$D_{\text{имп}}$, км	1,980

*Критическое значение параметра.

Таблица 4.12

Результаты распада и рассеяния Аризонского метеороида в варианте 5 (табл. 4.9 и 4.10)
 (железо, $D_0 \approx 59$ м, $M_0 \approx 8,4 \cdot 10^5$ т, $V_0 = 11$ км/с)

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	m_k	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	τ_k	φ_k , рад	Φ_k , 1/с	$V_{ПК}$, м/с	$R_{ПК}$, км
1	19,2	10966,0	46,828	2,0	0,31	—	—	—	—	—	—	—
Поворот 1												
2	18,2	10960,8	37,168	4,0	0,36	1,864	0,170	43	0,018	0,224	6,56	0,012
Поворот 2												
3	17,3	10953,3	29,500	8,0	0,42	1,870	0,171	54	0,033	0,410	11,53	0,022
Поворот 3												
4	16,4	10942,6	23,414	16,0	0,52	1,880	0,172	69	0,061	0,757	15,35	0,032
Поворот 4												
5	15,4	10927,4	18,584	32,0	0,66	1,893	0,173	87	0,114	1,486	25,88	0,042
Поворот 5												
6	14,4	10905,7	14,75	64,0	0,86	1,912	0,175	111	0,225	3,145	41,79	0,053
Поворот 6												
7	13,5	10874,4	11,707	$1,28 \cdot 10^2$	1,14	1,940	0,178	143	0,495	8,334	68,54	0,068
Поворот 7												
До следующего акта фрагментации												
						1,586*	0,146*		0,645*	14,898*	93,13*	
						0,396	0,037					0,091
8	12,5	10829,0	9,292	$2,56 \cdot 10^2$	1,55	1,982	0,183	184				
Поворот 8												
						1,187*	0,109*		0,643*	19,889*	114,74*	
До следующего акта фрагментации												
						0,859	0,080					0,123

Окончание таблицы 4.12

k	z_k , км	V_k , м/с	D_k , м	m_k	δU_k , %	l_k , км	t_k , с	τ_k	φ_k , рад	$\dot{\varphi}_k$, 1/с	$\dot{V}_{\text{ПК}}$, м/с	$R_{\text{ПК}}$, км
9	11,5	10762,4	7,375	$5,12 \cdot 10^2$	2,16	2,046	0,189	241				
Поворот 9												
До следующего акта фрагментации												
10	10,4	10662,9	5,854	$1,02 \cdot 10^3$	3,06	2,146	0,200	322				0,166
Поворот 10												
До следующего акта фрагментации												
11	9,2	10509,5	4,646	$2,05 \cdot 10^3$	4,46	2,312	0,218	443				0,224
Поворот 11												
До следующего акта фрагментации												
12	7,9	10258,5	3,688	$4,10 \cdot 10^3$	6,74	2,622	0,252	649				0,306
Поворот 12												
До следующего акта фрагментации												
13	6,2	9788,2	2,927	$8,19 \cdot 10^3$	11,02	3,350	0,334	1095				0,430
Поворот 13												
Фрагментация метеороида завершена												
				$\Sigma =$	11,02	12,310	2,442					0,437
При ударе в планету												
-	0,0	6760,6	2,927	-	-	11,814	1,438	-	-	-	$D_{\text{упр}}$, км	1,50

*Критическое значение параметра.

диаметр роя фрагментов в варианте 4 (≈ 2 км) в $\approx 1,7$ раза превышает диаметр кратера ($\approx 1,2$ км), но ближе к нему в варианте 5 ($\approx 1,5$ км), который поэтому представляется более вероятным. Заметим, что в обоих вариантах эффект «взрыва» тела мог проявиться не только при ударе о грунт, но и несколько ранее, в атмосфере, на высоте $(z_{\max})_n = 0,25$ км (табл. 4.10, вариант 4) или 2,5 км (там же, вариант 5).

Наконец, не может вызывать сомнений, что фрагментация МКТ с измельчением фрагментов числом $(\approx 4,1 - 8,2) \cdot 10^3$ до 3–4 м перед ударом о грунт «облегчила» дальнейшее их раздробление, испарение и рассеяние в результате взрыва на грунте. Поэтому неудивительно, что под дном кратера не найдено сколько-нибудь крупных фрагментов, и уж тем более монолитного родительского тела.

Итак, расчеты, проведенные в рамках данной модели распада МКТ, лишней раз подтверждают следующее:

1) наиболее надежным параметром является энергия удара, а оценки, сделанные без ее учета, скорее всего, не будут соответствовать действительности и не смогут пролить свет на события тех дней;

2) при энергии удара Аризонского метеороида о грунт $U_{imp}^* \approx \approx 1,9 \cdot 10^{16}$ Дж, оцененной с помощью формулы (4.1) по фактическому диаметру кратера, вероятными параметрами этого МКТ могли быть, так сказать, экспериментально обоснованные пары значений D_0 и V_0 , например, 62 м и 8 км/с или 59 м и 11 км/с. Возможны и другие пары с меньшими D_0 и соответственно бóльшими значениями V_0 , но такими, чтобы сохранялась указанная энергия U_{imp}^* ;

3) по крайней мере, в рассмотренных вариантах расчетные диаметры роя фрагментов при ударе о грунт соизмеримы с диаметром кратера, а при варианте 5 они практически совпадают. Следовательно, принятые исходные данные и результаты расчетов с удовлетворительной вероятностью соответствуют фактам, имевшим место при пришествии «Огненного Бога» на землю древней Аризоны;

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 Икар 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 $U_0 \approx 1,5 \cdot 10^{22} \text{ Дж}$ ($\approx 3,6 \cdot 10^{12} \text{ т ТНТ}$).