

Модели происхождения
Луны; ранняя история
Земли и Венеры
(роль приливного трения в
образовании структуры
планет)



Г. В. Печерникова и Е.Л. Рускол

ГАИШ, ноябрь 2016

Теории происхождения Луны можно подразделить на несколько направлений. Здесь мы рассмотрим модели твердотельной аккумуляции:

I – модели ко-аккреции – описывают формирование долунного околоземного роя, как процесс, сопутствующий росту Земли;

II – модели гигантского удара (мегаимпакта) – столкновения прото-Земли на поздней стадии её роста с другим крупным телом;

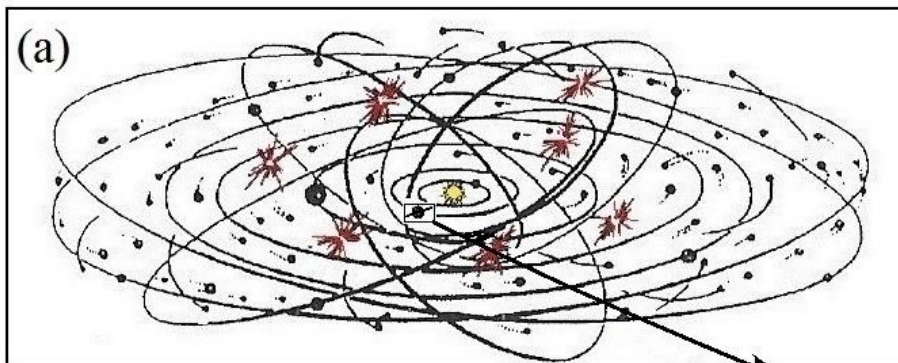
III – обобщенная модель ко-аккреции, учитывающая вклад ударов крупных тел – макроимпакты.

Образование Луны – старая и очень важная проблема планетологии и геофизики, которая до сих пор не имеет окончательного решения.

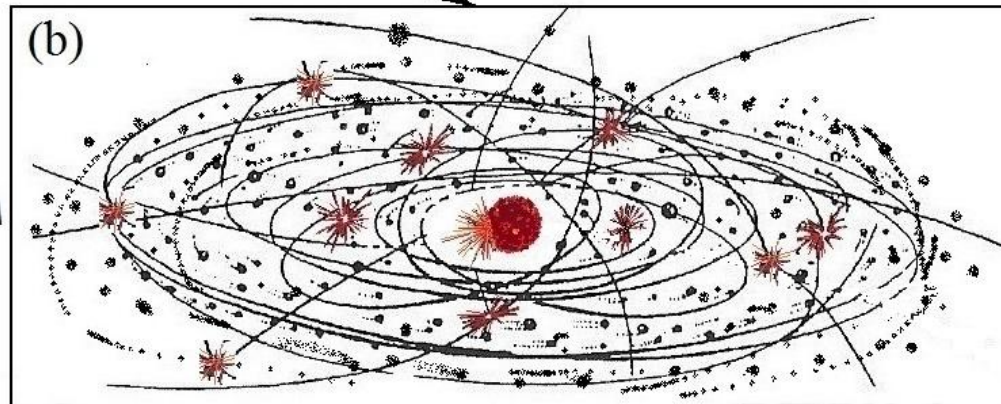
Любая теория происхождения Луны должна удовлетворять основным характеристикам системы Земля–Луна. Это определенная масса Луны (0.012 от массы Земли), угловой момент системы, низкая плотность Луны по сравнению с Землей, недостаток железа в Луне, схожесть и различие Земли и Луны по ряду геохимических показателей (например, сходство в относительном содержании изотопов кислорода и обедненность Луны летучими элементами).

Модель ко-аккреции

Модель ко-аккреции системы Земля–Луна описывает эволюцию доспутникового околопланетного роя, растущего за счет аккреции вещества из зоны питания планеты в процессе ее роста.



(a) Допланетный диск на основной стадии роста планет



(b) Растущая Земля с долунным роём

Впервые такую теорию выдвинула в 1960-е годы Евгения Рускол [1] на основе идеи академика О.Ю. Шмидта об образовании спутников как процессе, сопровождающем рост планет.

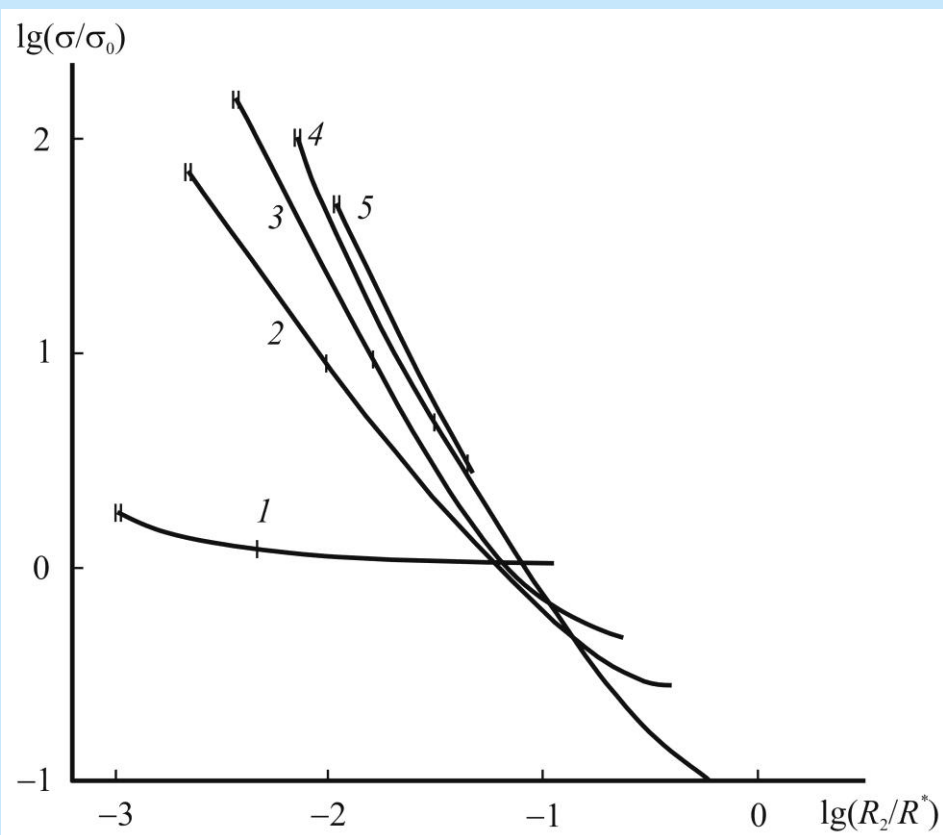
Расширение теории аккумуляции массы и углового момента на случай планеты с роем делает возможным построение теории эволюции околопланетного диска. В приближении плоского роя (модель относительно тонкого диска, вращающегося с кеплеровской скоростью вокруг его оси симметрии z , проходящей через планету), изменение поверхностной плотности вещества в диске $\sigma_2(R_2, t)$ определяется уравнением [2]:

$$- \frac{1}{R_2} \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{R_2} \frac{\partial}{\partial z} \right) \right) \left(\frac{\partial}{\partial z} \right)$$

где индексы 1 и 2 относятся к величинам, связанным с зоной питания планеты и околопланетным роем, соответственно. Через R_2 обозначено расстояние в рое от оси симметрии z , v_{Ri} – радиальная скорость перемещения вещества, вызываемого i -м фактором, и I_j – поток вещества, присоединяющегося к рою (на единичную площадку, перпендикулярную оси z), создаваемый фактором j . Второе слагаемое описывает процессы, доминирующие в перераспределении вещества в рое, т.е. радиальную диффузию и радиальный дрейф из-за дефицита углового момента захваченного вещества и роста самой планеты.

Рой оказывается сильно уплощенным вблизи планеты и почти сферичен на его периферии.

Основными источниками вещества в рое в модели ко-аккреции [3] рассматривались гравитационный захват в сферу Хилла растущей планеты при неупругих столкновениях частиц, не связанных с планетой (“свободно-свободные” столкновения), и захват частиц зоны питания планеты при их столкновениях с частицами роя (“свободно-связанные” столкновения). Однако из этих моделей следует дефицит массы и углового момента, хотя ко-аккреционные модели хорошо описывают спутниковые системы планет-гигантов. Остается нерешенной и проблема состава долунного роя.



В [2] в результате решения уравнения (1) получено изменение распределения поверхностной плотности в околоземном рое со временем. Параметры модели, соответствующие различным кривым, см. в таблице. R_2 нормировано на $R^* = R_{L1}$ для современной Земли. На кривых предел Роша показан знаком (II), $R_2 = 10 r_p$ — знаком (I).

N	1	2	3	4	5
t (лет)	$6.2 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$2.3 \cdot 10^7$	$5.0 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^8$
$m_p/m_{\oplus}$	0.001	0.010	0.043	0.30	0.94
m_{sw}	$5 \cdot 10^{19}$	$1.2 \cdot 10^{20}$	$1.9 \cdot 10^{20}$	$2.5 \cdot 10^{20}$	$1.3 \cdot 10^{20}$

Как выяснилось позднее, в этой модели существенно занижена вероятность захвата в рой частиц зоны питания планеты.

Модели гигантского удара (мегаимпакта)

В 1975 г. американские ученые А. Камерон и В. Уорд и одновременно В. Хартман и Д. Дэвис предложили для объяснения уникальной массивной Луны уникальный способ её образования: в результате катастрофического столкновения Земли с крупным космическим телом размером с Марс (**гипотеза мегаимпакта**).

В нужный момент (при заданной массе растущей Земли) космическое тело заданной массы с заданной скоростью ударяет в нужную точку на поверхности растущей Земли так, чтобы их **суммарная масса и момент количества движения были равны массе и моменту системы Земля-Луна**.



Столкновение Земли с небесным телом размером примерно с Марс, в результате которого произошел выброс расплавленного вещества. В результате огромная масса земного и частично материала ударника расплавилась и была выброшена на околоземную орбиту, где быстро аккумулялировалась в Луну.

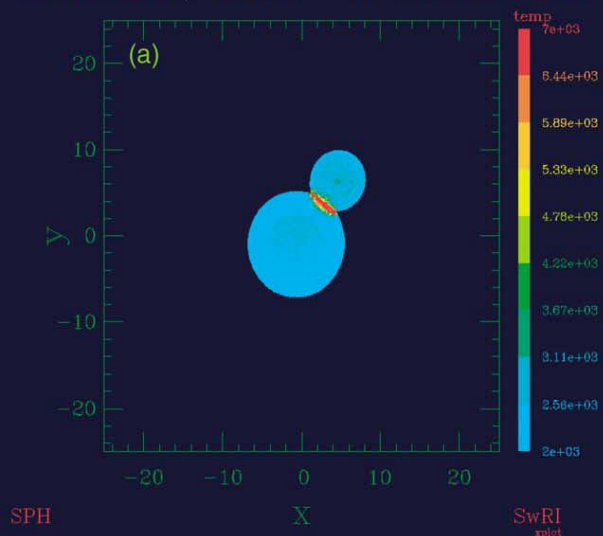
На конференции 1984 г. на Гавайях была представлена целая серия работ по моделям мегаимпакта, и гипотеза происхождения Луны в результате гигантского удара приобретает все большую популярность. Он (удар) дает объяснение высокому значению углового момента системы Земля–Луна, наклону оси Земли. Легко объясняется и более низкое содержание железа в Луне, так как предполагается, что катастрофическое столкновение произошло после образования ядра Земли, а Луна образовалась в основном из каменного вещества земной мантии.

Но, как бы решая проблемы Луны в один прием, мегаимпакт сам создает проблемы. Так, энергия мегаимпакта при столкновении ударника с Землей со скоростью 14 - 15 км/с составляет более 10^{39} эрг. Этого достаточно, чтобы расплавить большую часть Земли, а также испарить какую-то ее часть. Образуется горячая силикатно-магниева атмосфера, и Земля в течение 10 - 100 лет светит как коричневый карлик - звезда с температурой фотосферы 2000 К. Необходим критический анализ возможности такого этапа в ранней истории Земли.

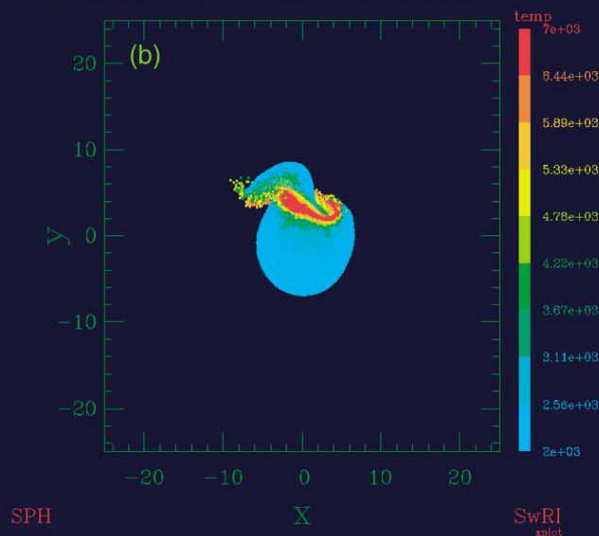
Появляются все более сложные сценарии мегаимпакта вплоть до «неканонических» в попытках объяснить современные характеристики системы Земля–Луна. Большая часть работ посвящена проблеме различий химического состава вещества Луны и Земли при почти полном совпадении изотопных систем.

Как пишет Джей Мелош (2014), «последние сравнения изотопного состава Земли и Луны показывают, что, в отличие от почти всех других тел, известных в Солнечной системе, изотопные отношения нашего спутника являются почти идентичными земным почти для каждой изотопной системы... И эту ситуацию трудно объяснить на основе современных импактных моделей происхождения Луны».

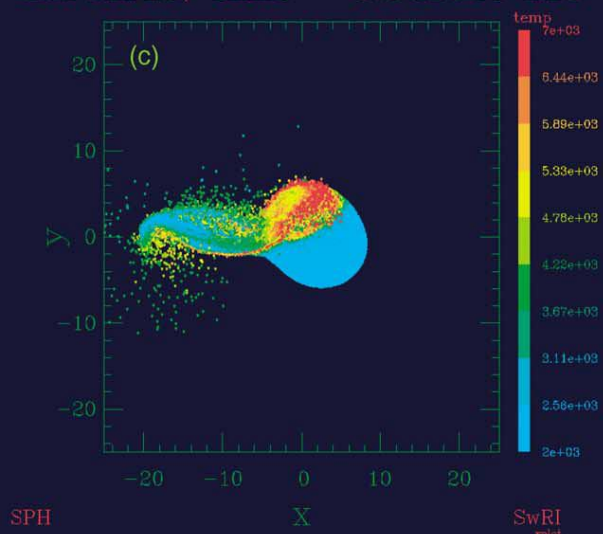
Earth119; Time = 0.108011 hrs



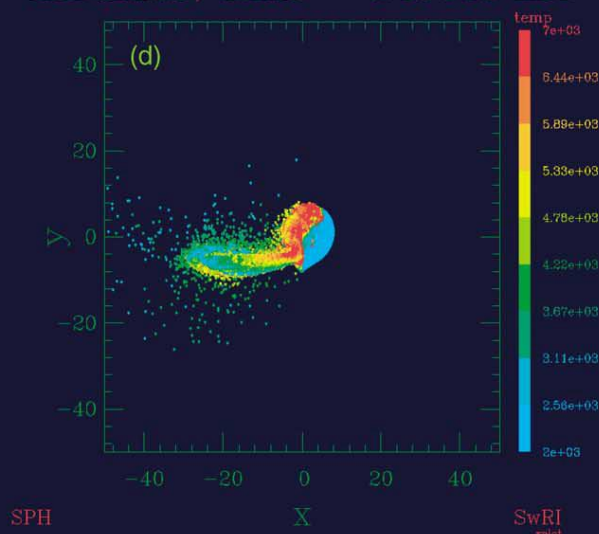
Earth119; Time = 0.32344 hrs



Earth119; Time = 0.863146 hrs



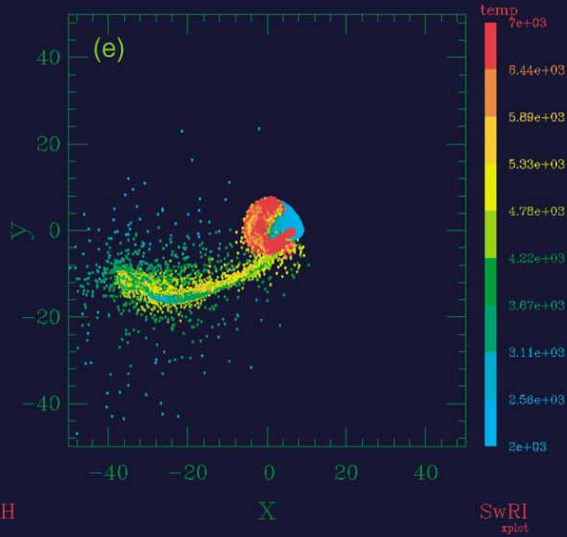
Earth119; Time = 1.40212 hrs



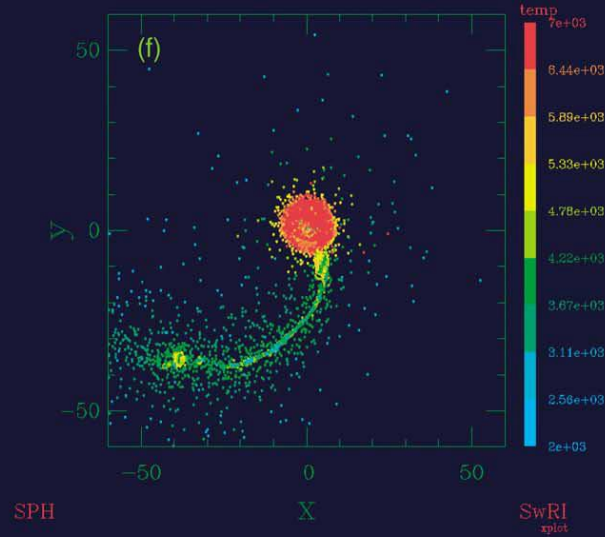
R.M. Canup / Icarus
168 (2004) 433–456

Эту работу можно отнести к каноническим моделям. Приведены около 100 результатов моделирования потенциальных формирующих Луну ударов в сценарии “позднего импакта” (вблизи конца аккумуляции Земли). Результаты 47 из них признаны успешными.

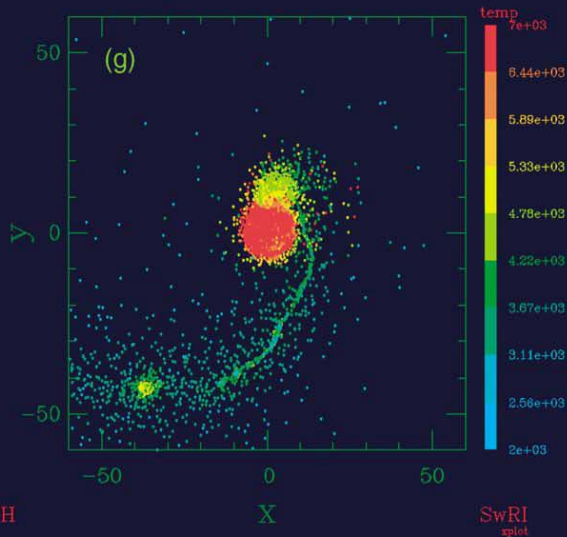
Earth119; Time = 2.15681 hrs



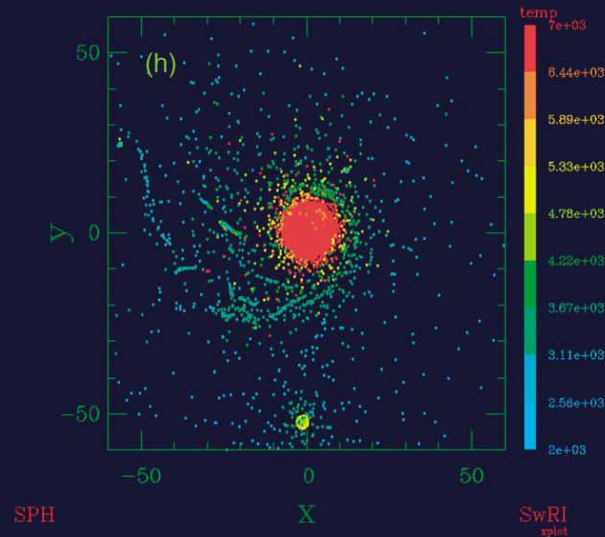
Earth119; Time = 4.85156 hrs



Earth119; Time = 5.9297 hrs



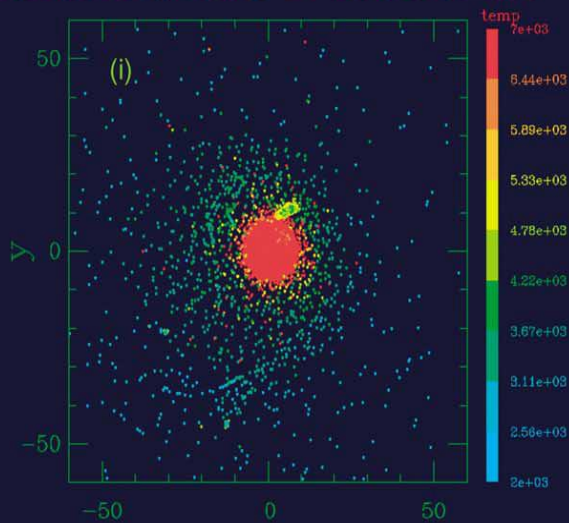
Earth119; Time = 13.4756 hrs



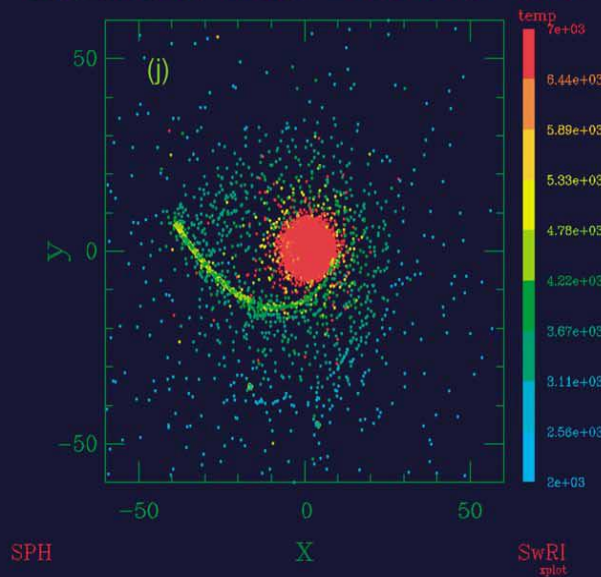
Успешные импакты
включают:
масса ударника от 1
до 1.3 массы Марса,
суммарная масса тел
 $M_T \geq 0,95 M_{\oplus}$,
скорости удара
 $1.0 \leq (v_{\text{imp}}/v_{\text{esc}}) \leq 1.1$,
диапазон угла удара
от 42 до 50 градусов,
угловой момент в
диапазоне
 $1.07 \leq L/L_{\text{EM}} \leq 1.37$.

*Продолжение
рисунка*

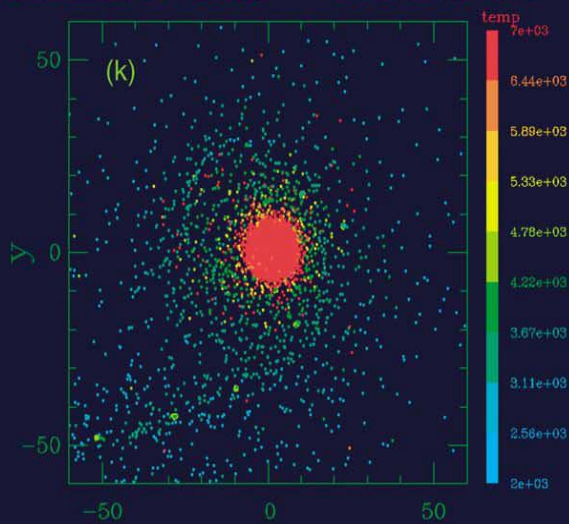
Earth119; Time = 18.8651 hrs



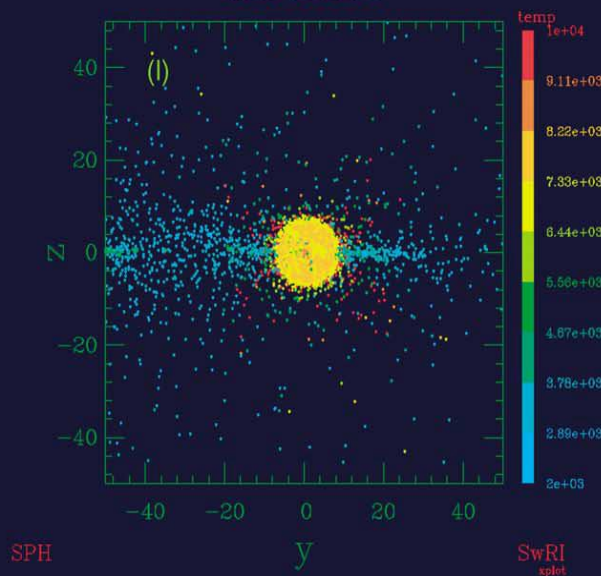
Earth119; Time = 21.0217 hrs



Earth119; Time = 26.9504 hrs



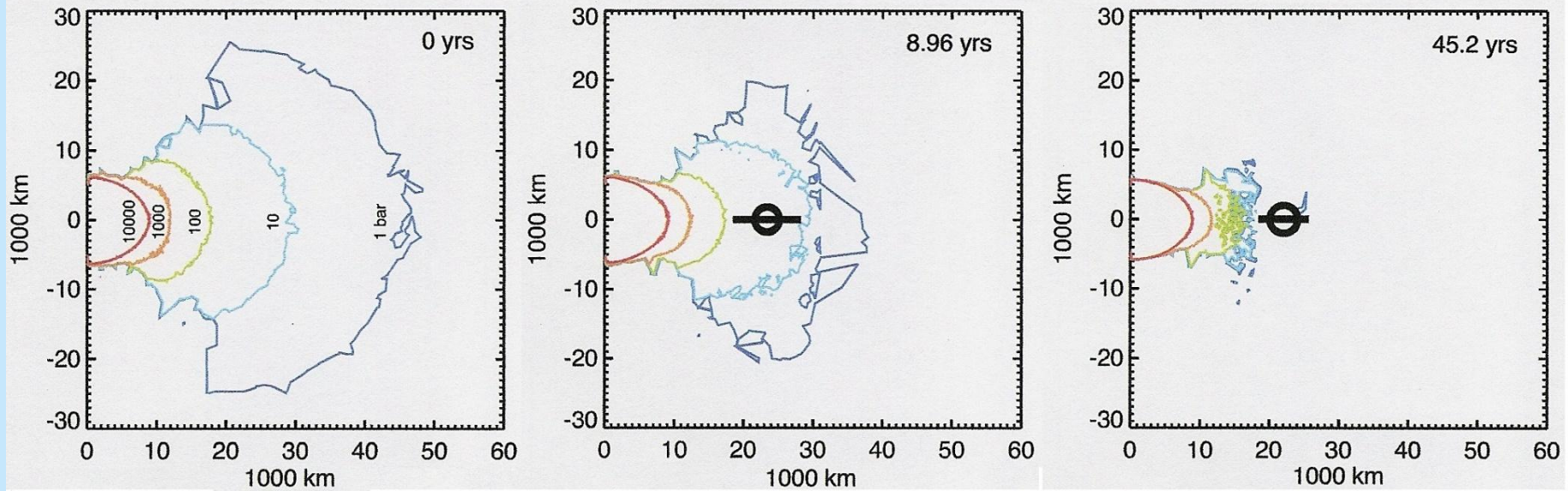
Earth119



Продолжение
рисунка

В ряде работ за последние два десятилетия было показано, что Луна и Земля идентичны по изотопным системам кислорода, вольфрама, хрома и титана. Для объяснения этой ситуации в рамках гипотезы мегаимпакта в 2012 году предложена новая модель – не каноническая [8].

В качестве мишени принята быстро вращающаяся (из-за **многочисленных** гигантских ударов) Земля с массой от 0.99 до $1.05 M_{\oplus}$, периодом вращения от 2.3 до 2.7 ч. и угловым моментом от 2.1 до 3.1 L_{EM} . В результате **последнего** гигантского удара (масса ударника от 0.026 до $0.1 M_{\oplus}$, скорость V_i от 10 до 30 км/с) образуется диск достаточно массивный для образования Луны в основном из вещества Земли. Впоследствии избыток углового момента был потерян в ходе приливной эволюции Луны. Эта модель получила дальнейшее развитие в [9] и еще в шести работах с участием тех же авторов (47th LPSC, 2016).



Модель охлаждения постимпактной паровой структуры вокруг Земли. Показаны контуры уровней давления. Луна (в масштабе) показана черным цветом с указанной неопределенностью радиуса орбиты. Новая модель образования Луны после мегаимпакта. Гигантские удары с высокой энергией, большим угловым моментом оставляют Землю в состоянии, в котором мантийная атмосфера и диск (МАД) образуют хорошо перемешанную непрерывную расширенную структуру, выходящую за рамки предела Роша. Растущая Луна уравнивается с bulk silicate Earth (BSE) и порождает наблюдаемые лунную химию и изотопное сходство с Землей [9].

Авторы “неканонической” модели формирования системы Земля–Луна в последней своей работе ([10] от 31.10.2016) сначала создают большой угол наклона (70°) оси быстро вращающейся (с периодом 2.5 часа!) Земли к плоскости эклиптики и большое наклонение лунной орбиты при соответственно большом угловом моменте системы, а потом с ними борются.

С соответствующим подбором входных параметров можно объяснить почти всё. Остаются вопрос о вероятности такого “специально подобранного” удара и некоторые проблемы геохимического характера.

Кроме того, спутник Плутона – Харон, открытый в 1978 г. и оказавшийся по массе в $1/8$ от планеты, показал, что ничего уникального в массивной Луне нет.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ АККУМУЛЯЦИЯ

две крайние модели

Модель I

Рускол Е.Л., 1960

Ко-аккреционная модель:
формирование долунного роя путем
гравитационного захвата тел
в сферу Хилла растущей планеты

Модель II

Hartmann W.K., Davis D.R., 1975;

Модель мегаимпакта:
формирование долунного роя в результате
выброса вещества при косом ударе
одного очень крупного тела

промежуточная модель

Модель III

Печерникова Г.В., 1989; Витязев А.В. и др., 1990

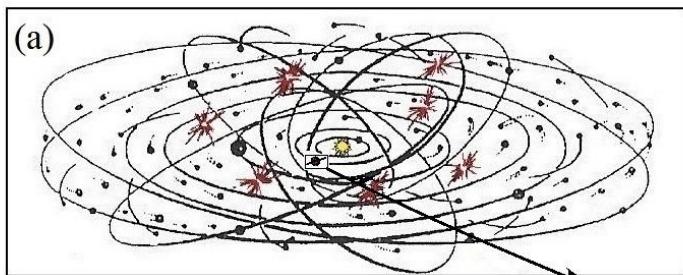
Обобщенная модель ко-аккреции:
формирование долунного роя путем гравитационного захвата
тел из зоны питания планеты и захват части вещества из
выбросов при ударах крупных тел в процессе роста планеты

Не раз отмечалось подобие планетных и спутниковых систем. И так же, как Солнце формировалось одновременно с допланетным диском, так и в ко-аккреционной модели рассматривается рост планеты с одновременным формированием околопланетного доспутникового роя.

Более того, распределения массы и момента количества движения в Солнечной системе и в спутниковых системах, в том числе и в системе Земля–Луна подобны – основная масса системы сосредоточена в центральном теле, тогда как момент – в телах на орбитах.

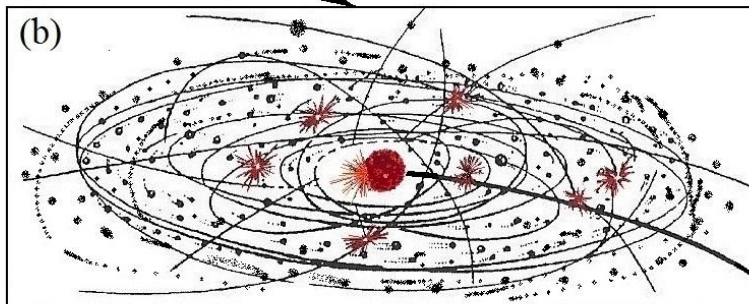
Обобщенная модель ко-аккреции

Образование околопланетных диспутниковых роев рассматривается как процесс, сопровождающий рост планет

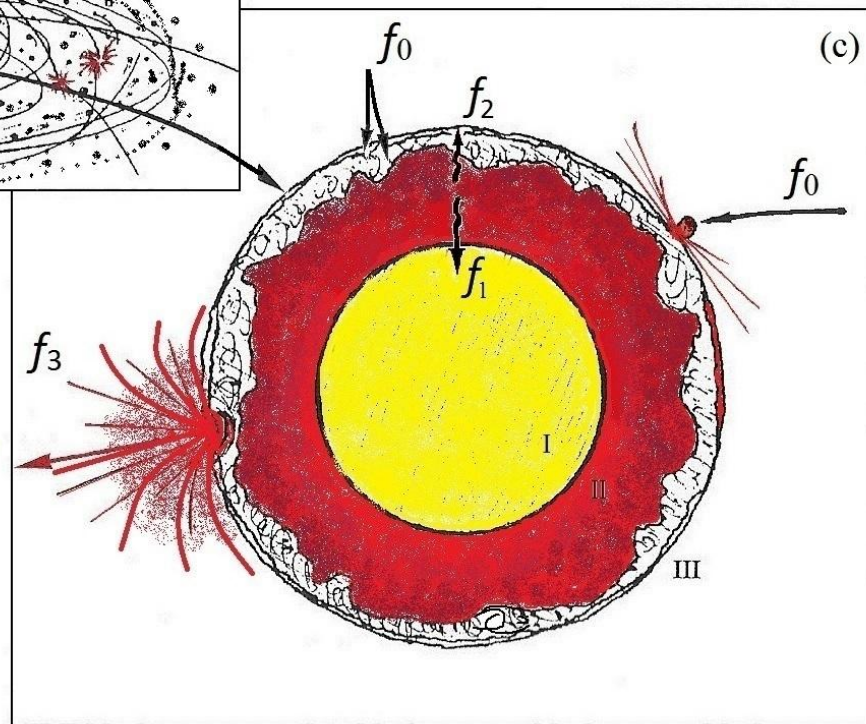


(a) Допланетный диск на основной стадии роста планет

(b) Растущая Земля с долунным роем



(c) Растущая Земля. Цифрами I, II и III обозначены первичное ядро, мантия и кора, формирующиеся в процессе роста Земли. Стрелками показаны потоки массы: f_0 из зоны питания планеты в мантию и кору; f_1 из мантии в ядро; f_2 из мантии в кору; и f_3 – вещество, выброшенное на баллистические и гелиоцентрические орбиты ударами. Показана "мгновенная" нижняя граница слоя, перемешиваемого ударами падающих тел.



Основные положения:

1. Образование диспутникового роя в обобщенной модели ко-аккреции рассматривается в рамках стандартного сценария формирования Солнечной системы [12];
2. Распределение по массам m' и относительным скоростям v' в рое допланетных тел является важнейшей характеристикой, определяющей динамику формирования планетной системы.

3. Распределение по массам допланетных тел

$$n(m', t) dm' = n_0(t) (m')^{-q} dm', \quad (1 < q < 2),$$

где $n_0(t)$ – коэффициент нормировки, $q < 2$ означает, что основная масса системы заключена в крупных телах.

Распределение крупных тел в зоне питания растущей Земли

Масса растущей Земли $m(t)$	$0.7 m_{\oplus}$	$0.9 m_{\oplus}$	$0.99 m_{\oplus}$
Время роста, 10^6 лет	~ 50	~ 80	~ 100
Массы и радиусы пяти крупнейших тел			
m_1 (Г)	$3.1 \cdot 10^{26}$	$1.1 \cdot 10^{26}$	$1.2 \cdot 10^{25}$
r_1 (км)	2600	1900	900
m_2 (Г)	$9.0 \cdot 10^{25}$	$3.1 \cdot 10^{25}$	$3.2 \cdot 10^{24}$
r_2 (км)	1700	1200	570
m_3 (Г)	$5.1 \cdot 10^{25}$	$1.8 \cdot 10^{25}$	$1.8 \cdot 10^{24}$
r_3 (км)	1400	1000	470
m_4 (Г)	$3.5 \cdot 10^{25}$	$1.2 \cdot 10^{25}$	$1.2 \cdot 10^{24}$
r_4 (км)	1300	900	420
m_5 (Г)	$2.6 \cdot 10^{25}$	$9.0 \cdot 10^{24}$	$9.0 \cdot 10^{23}$
r_5 (км)	1200	800	380
Интервал радиусов (км)	Число тел $N(r)$ в зоне питания планеты		
500 – 100	2150	870	127
100 – 10	$6.9 \cdot 10^5$	$2.8 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^4$
10 – 1	$2.2 \cdot 10^8$	$8.8 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^7$

4. Распределение хаотических скоростей планетезималей в зоне питания растущей планеты принимается в виде максвелловского [13]

$$f(\mathbf{v}') = \left(\frac{3}{2\pi \overline{v^2}} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{3v'^2}{2\overline{v^2}} \right)$$

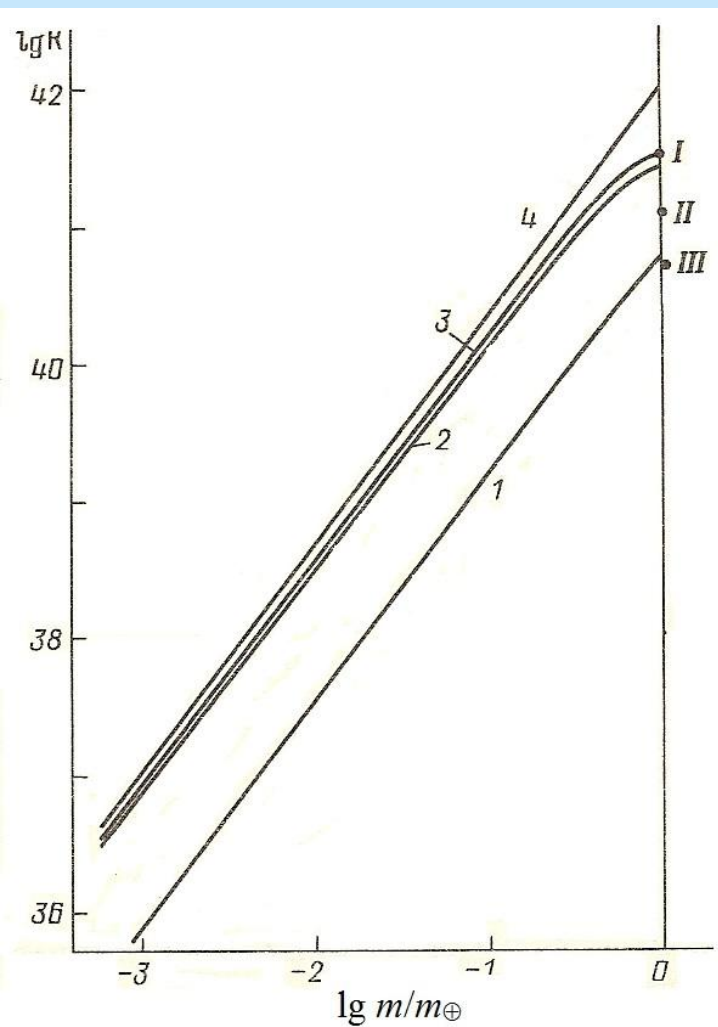
Здесь $\mathbf{v}'$ – скорость тела относительно круговой кеплеровской скорости в центральной плоскости роя.

Дисперсия скоростей определяется из уравнения баланса энергии в виде

$$\overline{v^2} = Gm/\theta r$$



ОСЕВОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТ, ПРИОБРЕТАЕМОЕ В ХОДЕ ИХ РОСТА



Слева – момент осевого вращения растущей Земли в зависимости от её массы (в $\text{г см}^2/\text{с}$):

1 – $K_1(m)$; 2 – $K_{\sigma}(m)$; 3 – $K = K_1 + K_{\sigma}$;
4 – K_{cr2} ;

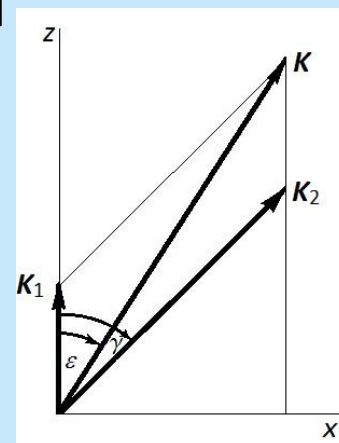
I – момент системы Земля – Луна $3.45 \cdot 10^{41}$,

II – момент Земли с периодом вращения 10 часов $1.4 \cdot 10^{41}$ и

III – современный момент Земли, заторможенной приливами $5.8 \cdot 10^{40}$.

Справа - диаграмма составляющих момента осевого вращения K :

K_1 – регулярная составляющая, K_2 – случайная



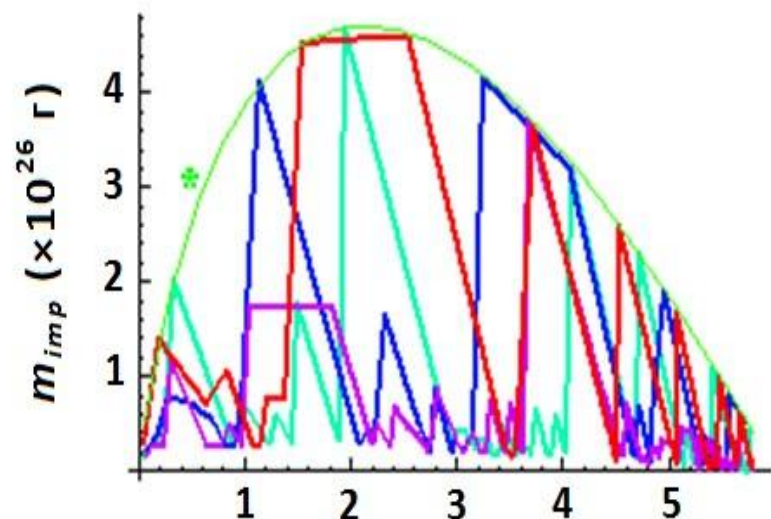
Для Земли к концу аккумуляции при $m(t) = m_p$ получены величины (в г см²/с):

$$\begin{aligned} K_1(m_p) &= 6.5 \cdot 10^{40}, & K(m_p) &= 1.4 \cdot 10^{41} \text{ (при } T = 10^h) \\ K_\sigma(m_p) &= 2.9 \cdot 10^{41}, \\ &= K_1(m_p) + K_\sigma(m_p) = 3.55 \cdot 10^{41}, & K_{EL} &= 3.45 \cdot 10^{41} \end{aligned}$$

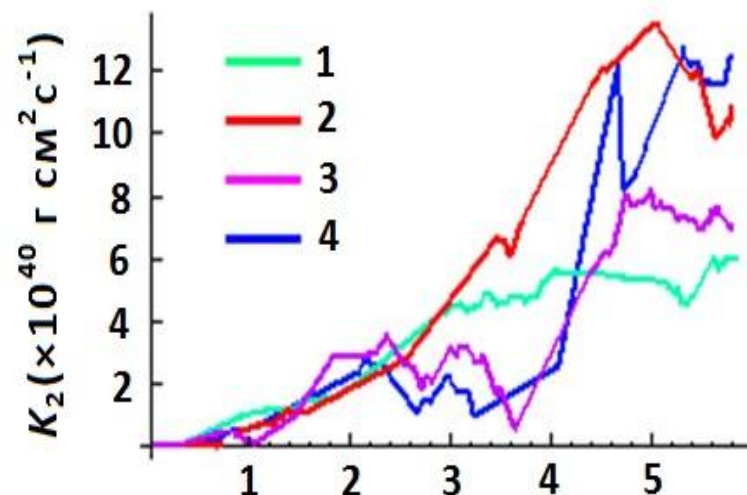
Следует отметить, что приобретение осевого вращения растущей планетой (без роя) оценивалось в предположении полного объединения сталкивающихся тел, а современный момент системы Земля–Луна без каких-либо дополнительных предположений попадает в полученный нами для Земли интервал .

При макроимпактах малая доля вещества сталкивающихся тел выбрасывается на баллистические и гелиоцентрические орбиты, унося с собой и часть момента, приносимого планете ударами. При реаккумуляции планетой и допланетным роем это вещество возвращает момент системе.

Удары крупнейших тел и приращение момента растущей планеты рассматривались в дискретной стохастической модели роста Земли [14]. Слева показано 4 сценария роста массы планеты с выделенными ударами крупнейших (от 5 до 7 с $m_{imp} > 10^{26}$ г) тел и соответствующего увеличения модуля случайного момента K_2 осевого вращения в результате ударов крупнейших тел (справа). На каждом шаге по времени случайным образом выбиралось тело-ударник из десяти крупнейших после растущей планеты тел, точка удара на поверхности планеты и направление скорости удара.



Масса растущей планеты m ($\times 10^{27}$ г)



Масса растущей планеты m ($\times 10^{27}$ г)

Одновременно вычислялись все необходимые согласно теории роста планеты непрерывные функции массы растущей планеты. Исследование показало, что в процессе роста Земля испытала не единственный гигантский удар (мегаимпакт), а несколько столкновений с телами с массами $m' > 10^{26}$ г. – макроимпактов.

Можно видеть, что с учетом регулярной составляющей момента $K_1(m_p) = 6.5 \cdot 10^{40}$ суммарный момент близок к наблюдаемому моменту системы.

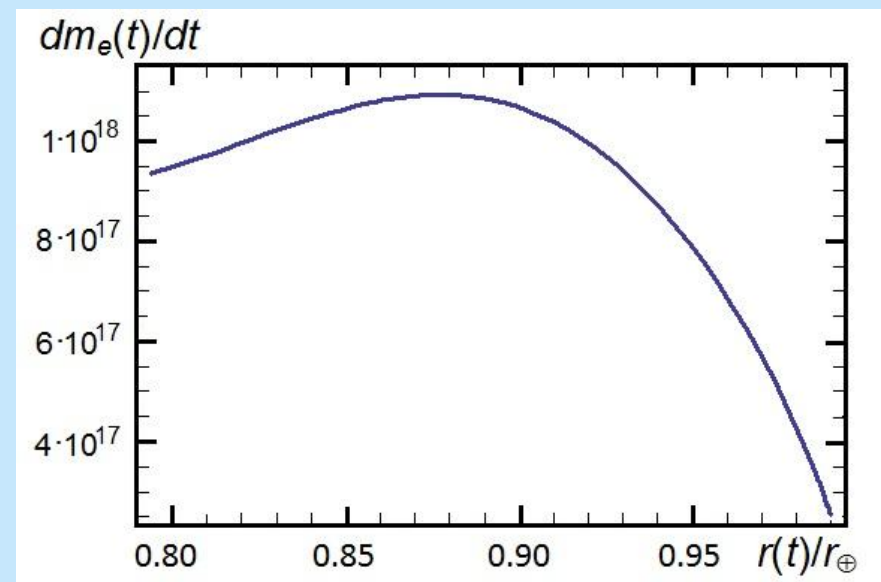
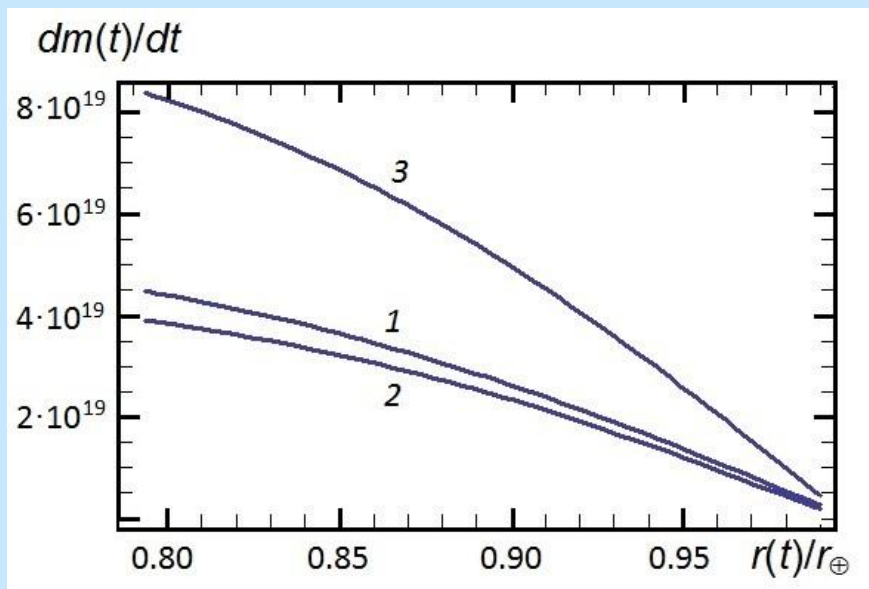
Приведенные выше “макро”-оценки накопления момента осевого вращения Земли не противоречат (и даже скорее подтверждают) возможность образования долунного роя с соответствующим орбитальным моментом.

В работах [15, 16] рассмотрена проблема однородности состава вещества, из которого формируются планетезимали, объединяющиеся в планету. К решению проблемы:

1. Быстрый рост ширины зоны питания приводит к хорошему перемешиванию планетезималей внутри зоны.
2. Рост планеты в основном за счет крупных тел, в которых вещество уже хорошо перемешано и при наборе массы на эллиптических орбитах в разных частях зоны питания планеты, и при ударах при столкновениях с меньшими телами [15], что приводит к гомогенизации её состава.
3. При разрушении допланетных тел в результате высокоскоростных столкновений [12] происходит разброс осколков, а затем их реаккумуляция другими телами □ дополнительное перемешивание.
4. Ранняя дифференциация и формирование ядер и мантий у растущей Земли и крупнейших планетезималей с соответственно близкими составами.

В работе [17] по результатам численного моделирования ударов допланетных тел по растущей Земле была получена аналитическая оценка интегральной массы выбросов – всего за время роста Земли, начиная с половины ее массы, на гелиоцентрические орбиты выбрасывается около 4% современной массы Земли, что более чем в три раза превышает массу Луны. Подпитка околоземного роя веществом, выброшенным на баллистические и гелиоцентрические орбиты, может существенно увеличить массу формирующегося долунного роя.

В работе [18] рассмотрен третий источник пополнения долунного роя веществом в дополнение к захвату тел при свободно-свободных и свободно-связанных столкновениях в сфере Хилла растущей планеты – получена оценка потока вещества, выброшенного при столкновениях планеты с допланетными телами на баллистические и гелиоцентрические орбиты в процессе её роста.



Слева – поток твердого вещества в г/год на растущую Землю в зависимости от её относительного размера: 1 – прирост массы за счет крупных тел, 2 – прирост массы за счет остальных тел, 3 – суммарный поток. Справа – поток вещества ударных выбросов с растущей планеты в г/год в зависимости от относительного радиуса планеты.

Выброшенное вещество распределяется в зоне вдоль планетной орбиты, поэтому фоновая плотность в сфере Хилла возрастает и соответственно увеличивается захват вещества в рой при свободно-свободных столкновениях.

Вещество, выбрасываемое с Земли на поздних стадиях аккумуляции и затем поступающее в рой, вследствие уже начавшейся дифференциации может быть значительно обеднено железом и летучими.

Наша обобщенная модель ко-аккреции (*модель III*) определяется двумя составляющими: *1* – образование околоземного роя в результате гравитационного захвата тел и частиц из зоны питания планеты в соответствии с *моделью I*; и *2* – подпитка околоземного роя веществом, выброшенным при макроударах на баллистические и гелиоцентрические орбиты при столкновениях частиц роя с частицами выбросов. Эффективность такого захвата показана в работе [19].

Как и другие модели, наша модель формирования системы Земля–Луна имеет как свои трудности и проблемы, так и преимущества.

Однако самое большое достоинство нашей статистической модели в том, что она **не предполагает никакого маловероятного события для объяснения происхождения и эволюции системы Земля–Луна и никаких заранее принятых значений параметров.**

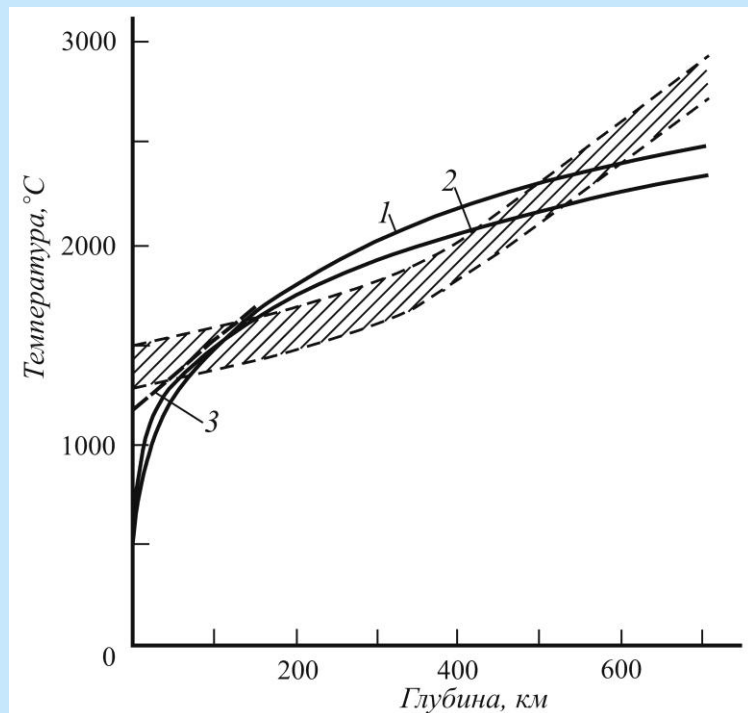
Ранняя история Земли и Венеры (роль приливного трения в образовании структуры планет)



Из истории лунной орбиты под действием приливов Луны и Солнца следует [20], что наиболее вероятной зоной для аккумуляции Луны из околоземного роя частиц и тел является пояс на расстояниях от 10 до до $30R_{\oplus}$, $R_{\oplus}$ – радиус современной Земли (сейчас Луна обращается на расстоянии $60.3R_{\oplus}$). При более близком начальном расстоянии плоскость её орбиты должна была бы совпадать с экваториальной плоскостью Земли, а при более далёком чем $30R_{\oplus}$ – с эклиптикой, чего не наблюдается. Приливная энергия при отодвигании Луны вероятнее всего тратится на нагревание слоев верхней мантии, где деформации значительны, а вязкость понижена. За всё время отодвигания в Земле выделилось $1-3 \cdot 10^{38}$ эрг, что ниже других источников энергии. Первичное вращение Земли могло быть с периодом около 10^h [21].



Тепловой режим Венеры оценивался в предположении, что её состав близок к земному, ядро составляет около 30% массы, а первичное вращение происходило с периодом 8^h . Тогда радиоактивный разогрев и энергия дифференциации (примерно поровну) составляли $2.5 \cdot 10^{38}$ эрг, а торможение вращения солнечными приливами дало на порядок меньший вклад энергии [22]. Приливная энергия выделялась в основном в недрах Венеры. Соответствующий нагрев в градусах на единицу массы составлял около 750° . Эволюция спутниковых орбит у медленно вращающихся планет приводит к выпадению на планеты [23]. Оба фактора – торможение начального более быстрого вращения Венеры и выпадение на нее спутников – могли дать ей суммарный нагрев в 1000° на единицу массы, самый высокий удельный нагрев из всех тел Солнечной системы, включая Землю.



Распределение температуры с глубиной в верхних слоях Венеры в современный момент (толщина коры 30 км). 1 – при базальтовой коре, 2 – при гранитной коре. Заштрихована полоса температур плавления по Аффену (1952), 3 – температура плавления безводного базальта.

Известно, что тектоника плит очень эффективна при охлаждении глубинных недр планеты, потому что холодные плиты проникают глубоко в мантию. Поэтому можно предположить, что ядро Земли охлаждено до температуры ниже ликвидуса основного сплава [24]. Тепловые модели эволюции показывают, что существование современного магнитного поля Земли связано с ростом внутреннего ядра (модель химического динамо) [25].

Венера – планета такого же размера, но высокая температура поверхности плюс дополнительный нагрев верхних слоев мантии за счет приливного торможения ее вращения привели к уменьшению градиента температуры. Ей не хватило такого эффективного механизма охлаждения, как тектоника плит, и, по-видимому, охлаждения за счет конвекции под стационарной корой. Следовательно, тепловой поток от ядра стал подкритическим с течением времени, и ядро могло быть недостаточно охлаждено для достижения температуры ликвидуса.

И в заключение, имеет ли планета земной группы конвекцию в ядре и может ли это быть термическое или химическое динамо, зависит от скорости охлаждения ядра, температуры ядра и температуры плавления ядра. Если мантия переносит достаточное количество тепла, то динамо работает, но если поверхность слишком изолирована, то нет динамо.



Спасибо за внимание!

Литература

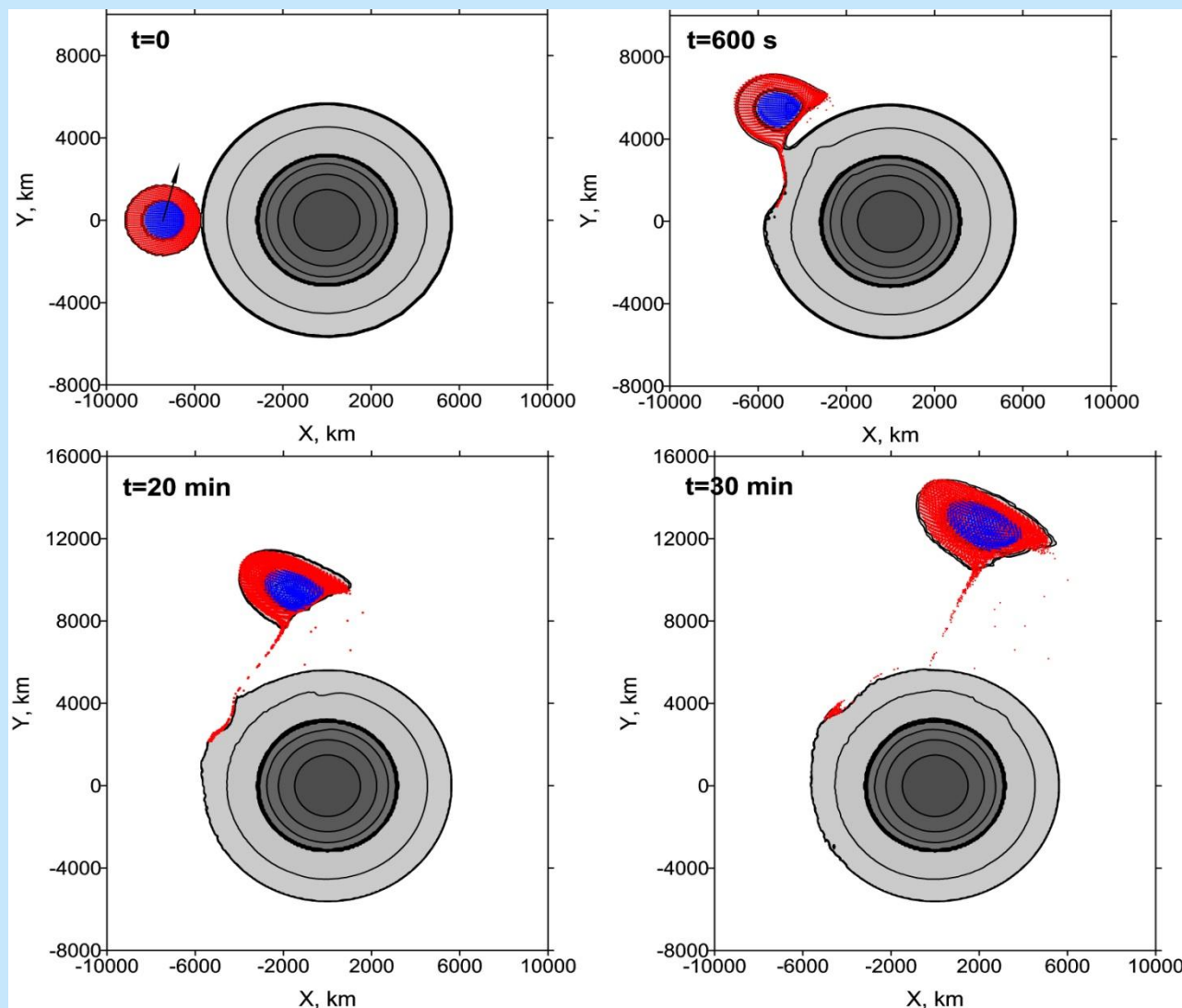
- 1.Рускол Е.Л. 1960. О происхождении Луны. I. Образование околоземного пояса тел // Астрон. Журн. Т. 37, вып. 3. С. 690-702.
- 2.Печерникова Г.В., Маева С.В., Витязев А.В. К динамике околопланетных поясов // Письма в "Астрон. журн." 1984. Т. 10. № 9. С. 703-709.
- 3.Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 185 с.
- 4.Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* 24, 1975. 504–515.
- 5.Cameron A.G.W., Ward W.R. The origin of the Moon. // Lunar and Planetary Science Conference VII. 1976. P. 120–122.
- 6.Melosh H.J. New approaches to the Moon's isotopic crisis // Phil. Trans. R. Soc. A 2014 372 20130168; DOI:10.1098/rsta.2013.0168. Published 11 August 2014.
- 7.Canup R.M. Simulations of a late lunar-forming impact // *Icarus*. 2004. V. 168. P. 433–456.
- 8.Ćuk M., Stewart S.T. Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning // *Science*. 2012. 338, p. 1047.
- 9.Lock S.J. et al. A new model for lunar origin: equilibration with earth beyond the hot spin Stability limit. // 47th Lunar and Planetary Science Conference (2016) 2881.

- 10.Ćuk M., Hamilton D.P., Lock S.J., Stewart S.T. Tidal evolution of the Moon from a high-obliquity, high-angular-momentum Earth // Nature, 2016. DOI: 10.1038/nature19846.
- 11.Печерникова Г.В., 1989. К формированию и эволюции околопланетных роев // Планетная космогония и науки о Земле / Под ред. В.А.Магницкого. М.: Наука. С. 106-139.
- 12.Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С., 1990. Планеты земной группы: Происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 296 с.
- 13.Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- 14.Pechernikova, G.V. Davidenko, I.W., Vityazev, A.V. 2003. Estimation of axial moment of the growing Earth // III Internat. Conf. On Large Meteorite Impacts. Nördlingen, Sess. 1. #4015.
- 15.Витязев А.В., Печерникова Г.В., 1996. Ранняя дифференциация Земли и проблема лунного состава // Физика Земли. 1996. № 6. С. 3-16.
- 16.Печерникова Г.В. О зоне питания растущей планеты и проблеме образования Луны // Сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 6. М.: ГЕОС, 2014. С. 154-162.

- 17.Светцов В.В. В развитие статистической модели образования Луны. II // Динамические процессы в геосферах. Сборник научных трудов ИДГ РАН, Выпуск 4, М.: ГЕОС, 2013. С. 66-73.
- 18.Печерникова Г.В. Масса вещества, выброшенного при макроударах с растущей планеты, и проблема образования Луны // Сборник научных трудов ИДГ РАН, вып. 7. М.: ГЕОС, 2015. С. 200-207
- 19.Горькавый Н.Н. Образование Луны и двойных астероидов // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 2007. **103**, № 2. С. 143-155.
- 20.Goldreich P. History of the lunar orbit // Revs Geophys. 1966. **4**, 411. Русск. перев. в сб.: Приливы и резонансы в Солнечной системе. М.: Мир, 1975.
- 21.Рускол Е.Л. Приливная эволюция системы Земля–Луна // Изв. АН СССР, серия геофиз. 1963. № 2, 216.
- 22.Маева С.В., Рускол Е.Л. О тепловой истории Венеры // Физика Земли, 1977. № 4. С. 3-7.
- 23.Burns J.A. Where are the satellites of the inner planets? // Nature Phys. Sci., 242, № 115. 1973.
- 24.Spohn T. [10.01 - Physics of Terrestrial Planets and Moons: An Introduction and Overview](#) // Treatise on Geophysics (Second Edition) / Editor-in-Chief: Gerald Schubert ISBN: 978-0-444-53803-1. [Volume 10: Physics of Terrestrial Planets and Moons](#). 2015. P. 1-22.

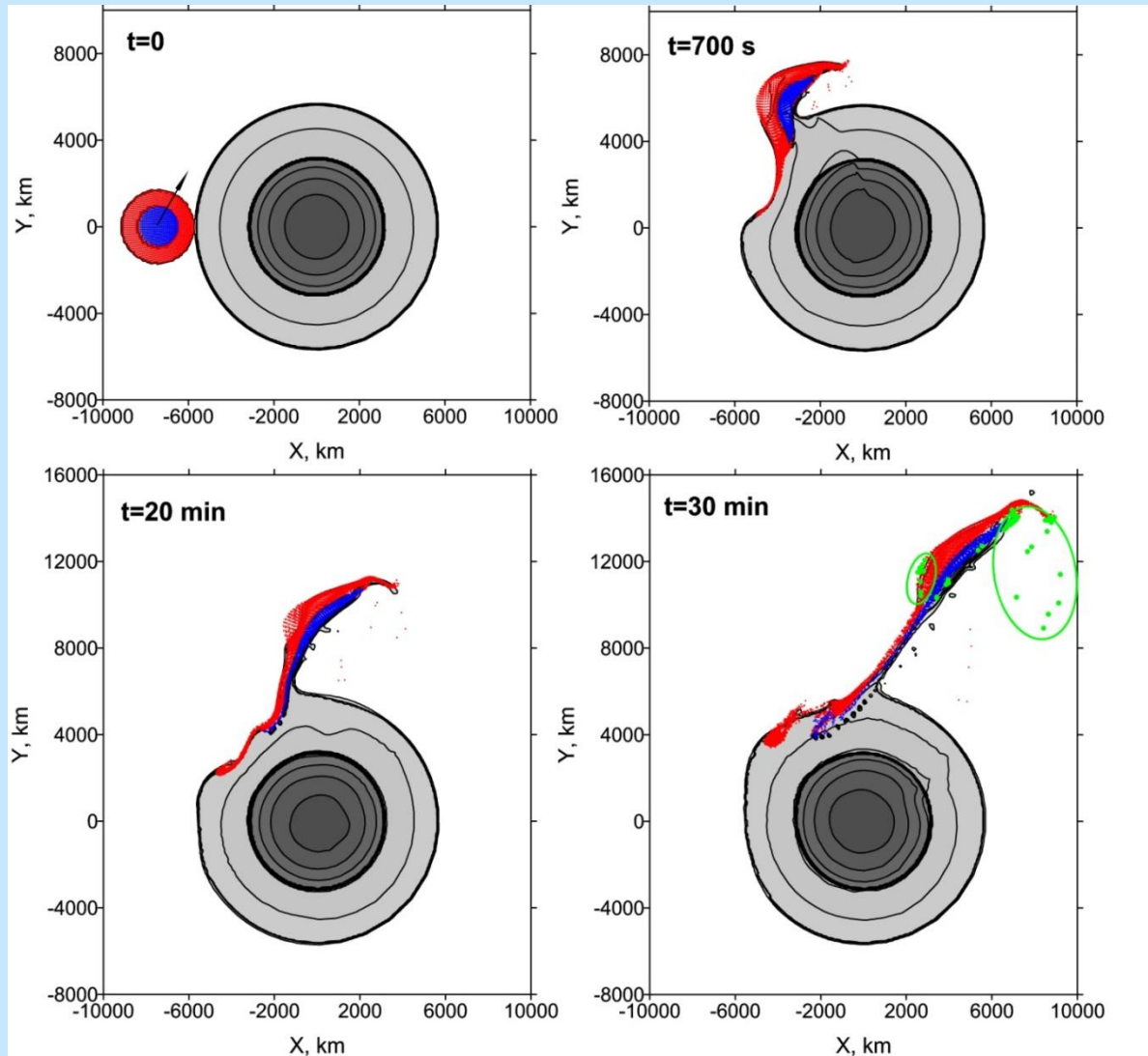
25. Breuer D., Moore W.B. 10.08 Dynamics and Thermal History of the Terrestrial Planets, the Moon, and Io // Treatise on Geophysics (Second Edition) / Editor-in-Chief: Gerald Schubert ISBN: 978-0-444-53803-1. [Volume 10: Physics of Terrestrial Planets and Moons](#). 2015. P. 255-305.

Угол удара 75° , относительный размер ударника $\delta=0.3$



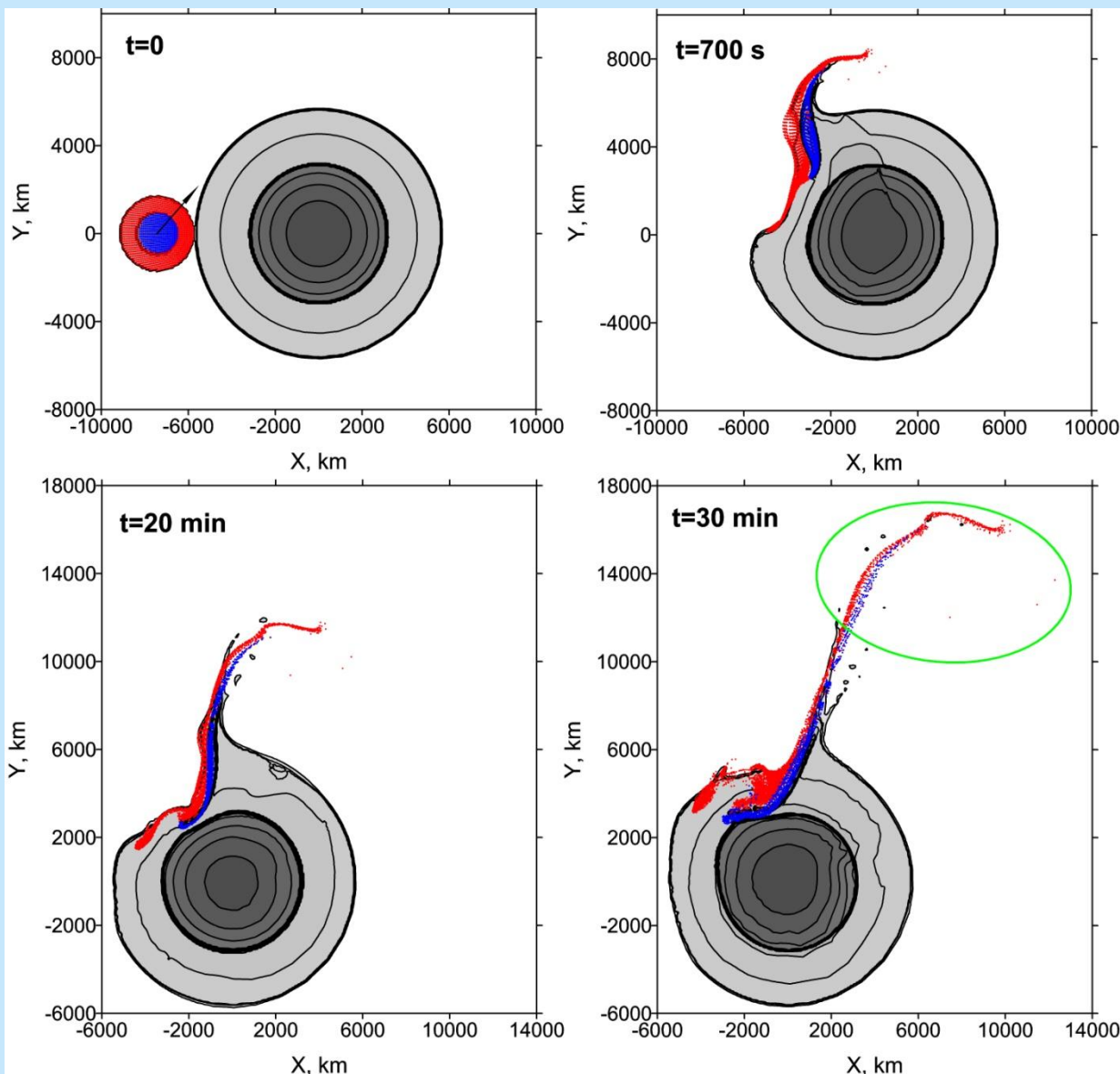
- Ударник разрушается, но остается в основном связанным.
- Кратер относительно мал.
- Выброшенный дисперсный материал составляет около 1% массы ударника.

Угол удара 60° , относительный размер ударника $\delta=0.3$



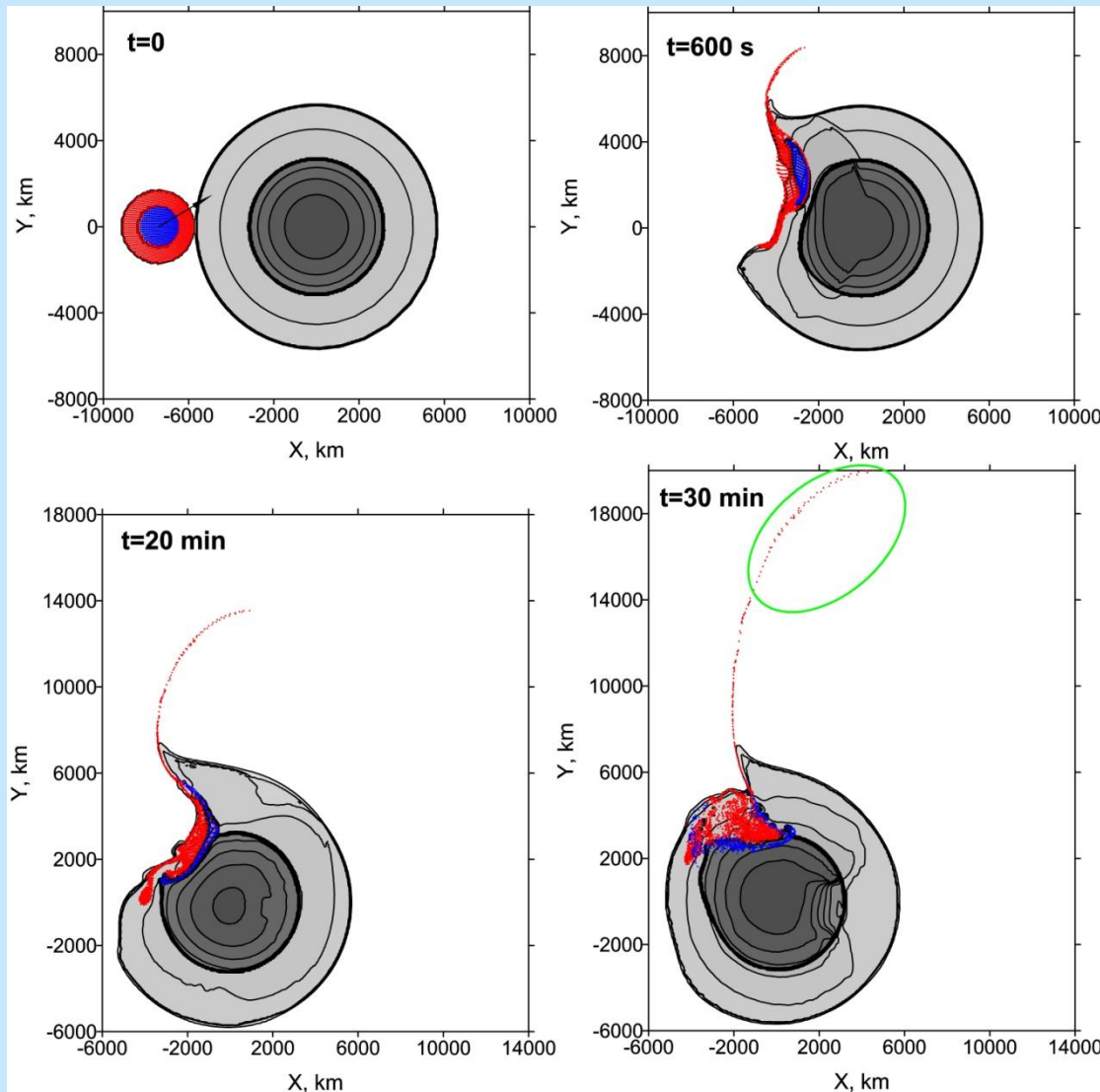
- Ударник частично разрушается, но позже существенно реаккумулируется
- Большой кратер.
- Выброшенный дисперсный материал составляет около 8.5% массы ударника.

Угол удара 50° , относительный размер ударника $\delta=0.3$



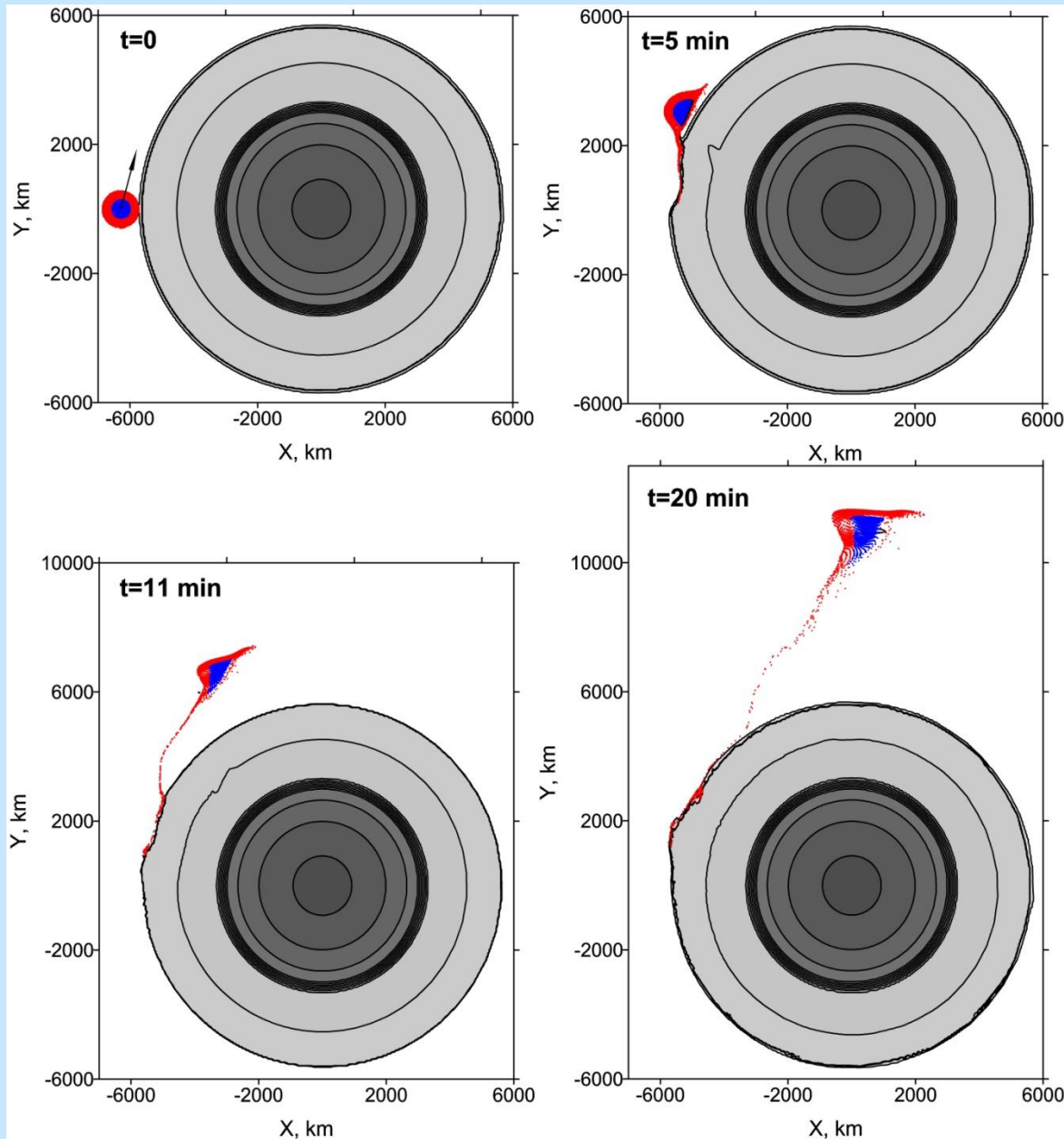
- Ударник полностью разрушается.
- Очень большой кратер.
- Выброшенный дисперсный материал составляет около 15% массы ударника.

Угол удара 30° , относительный размер ударника $\delta = 0.3$



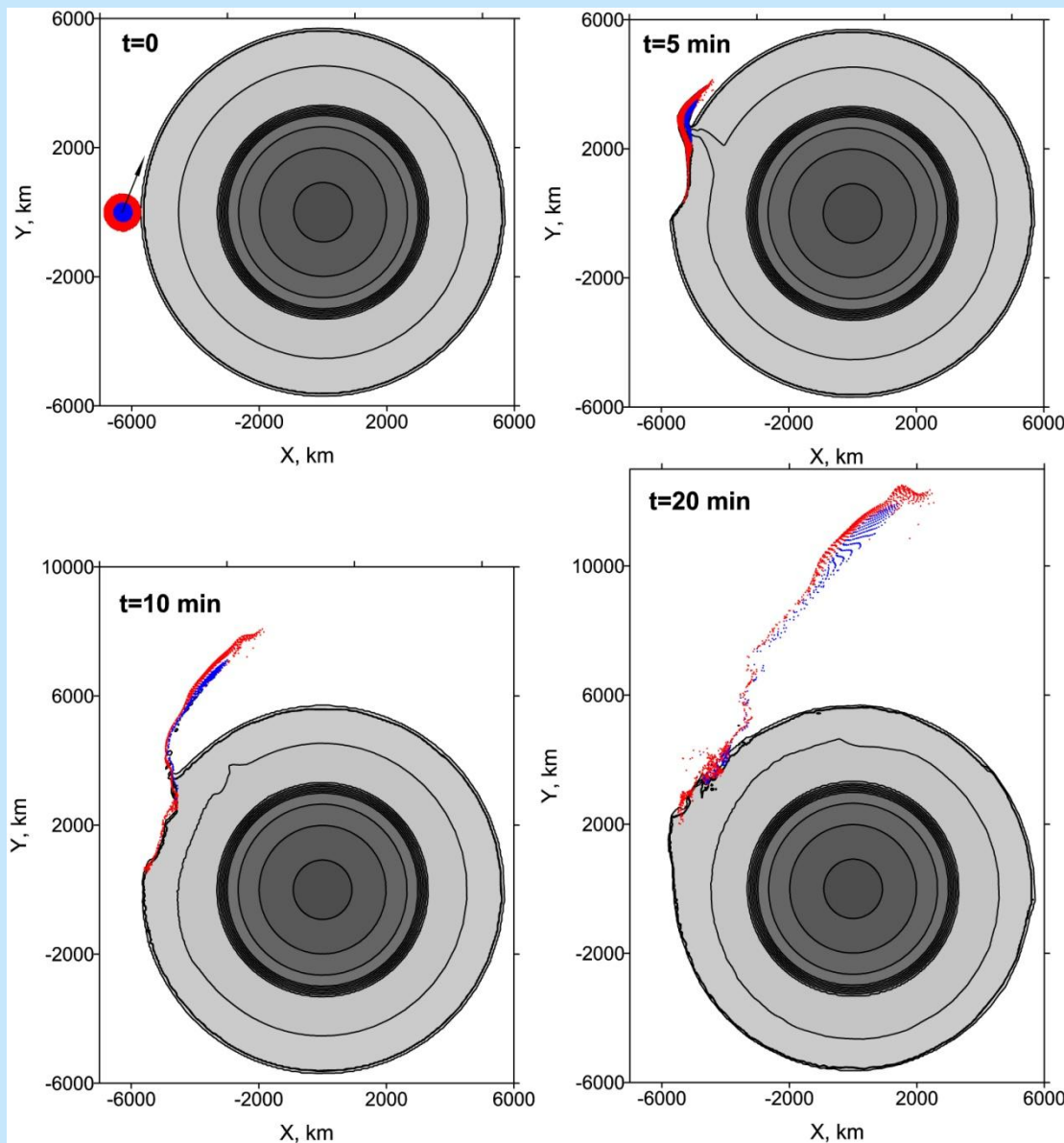
- Ударник плавится и остается внутри кратера.
- Огромный кратер.
- Выброшенный дисперсный материал составляет около 7% массы ударника.

Угол удара 75° , относительный размер ударника $\delta = 0.1$

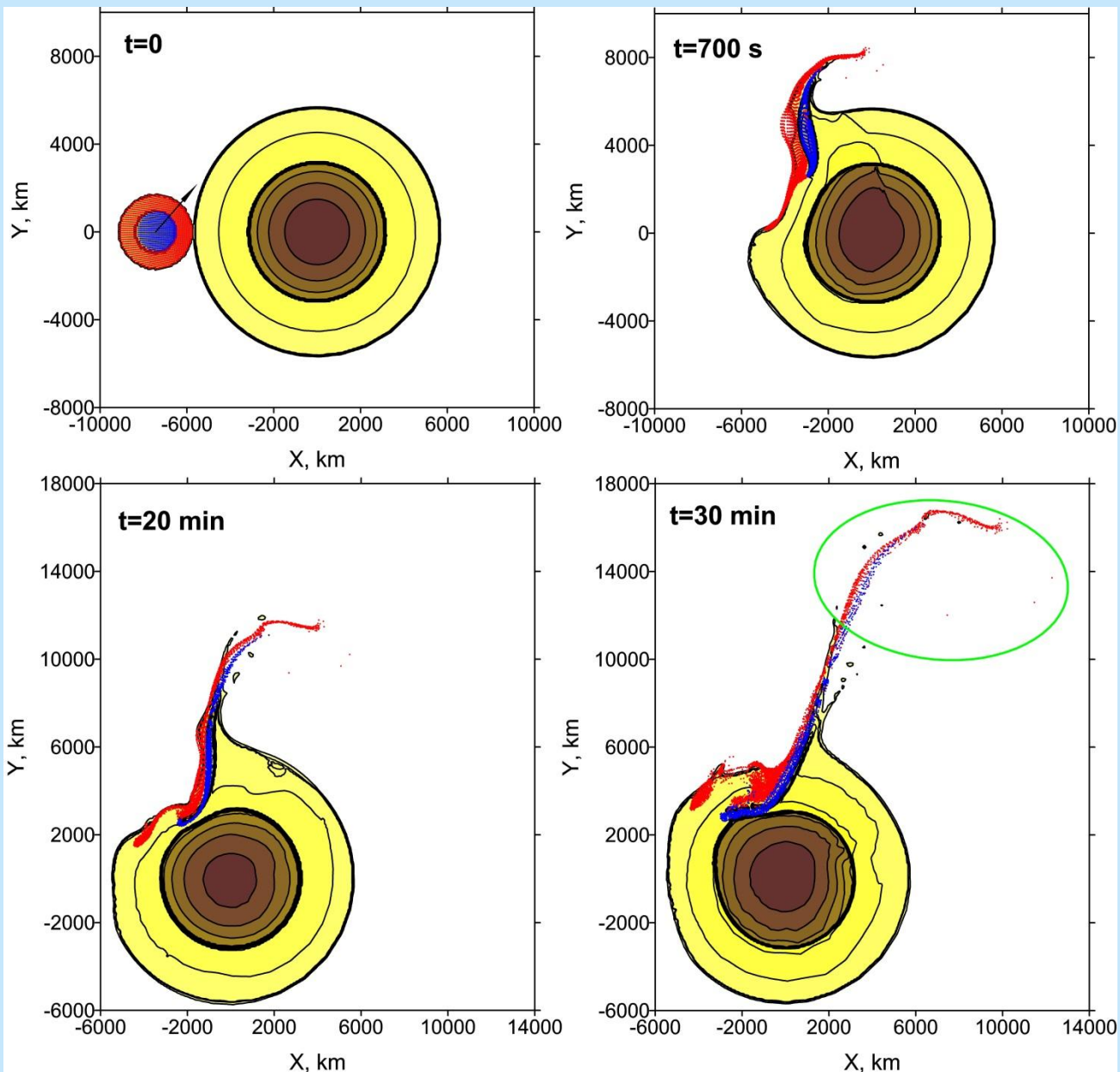


- Ударник разрушается, но остается в основном связанным.
- Кратер маленький.
- Выброшенный дисперсный материал составляет около 15% массы ударника.

Угол удара 67° , относительный размер ударника $\delta = 0.1$

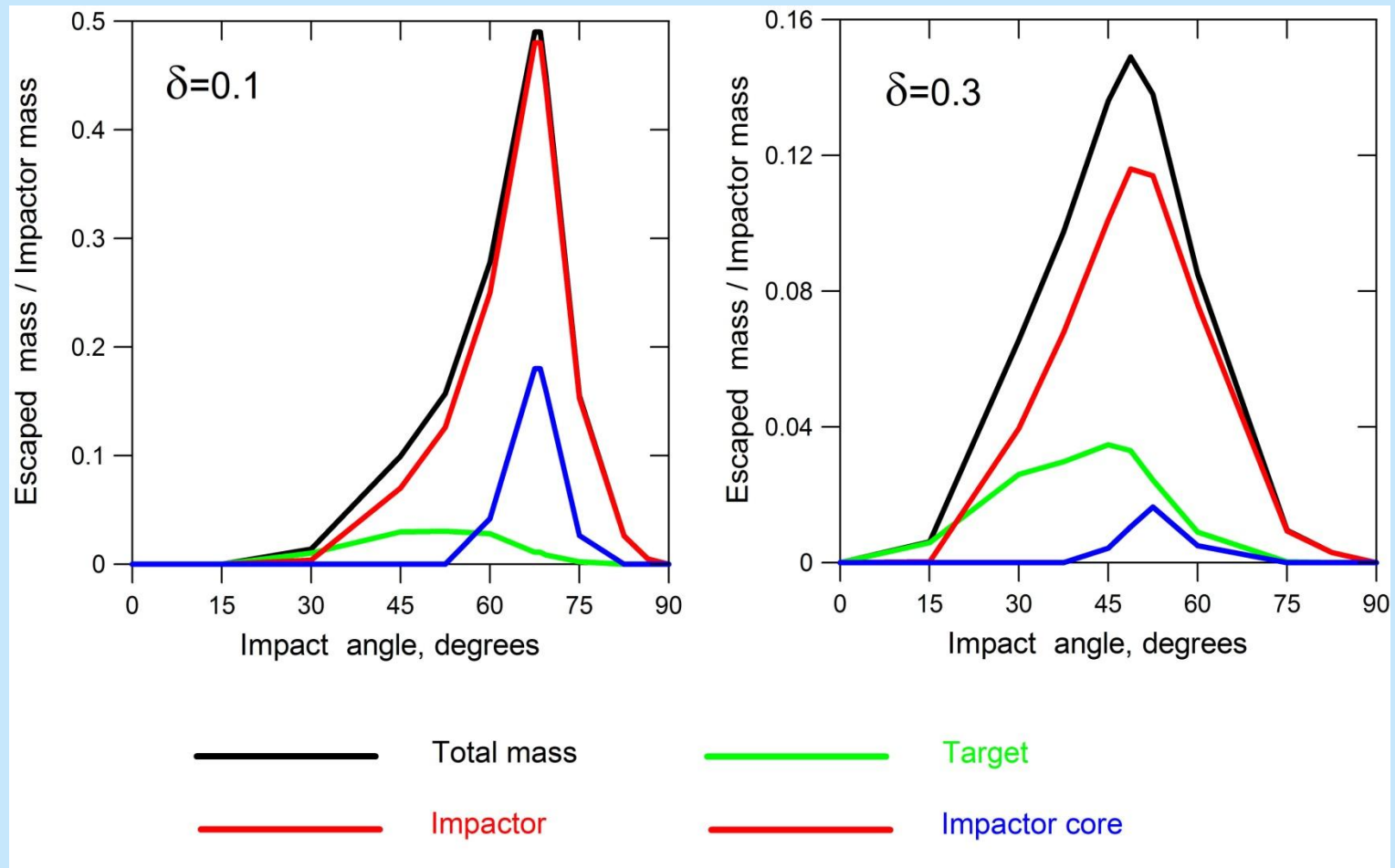


- Ударник полностью разрушается.
- Кратер относительно мал.
- Выброшенный дисперсный материал составляет около 50% массы ударника.



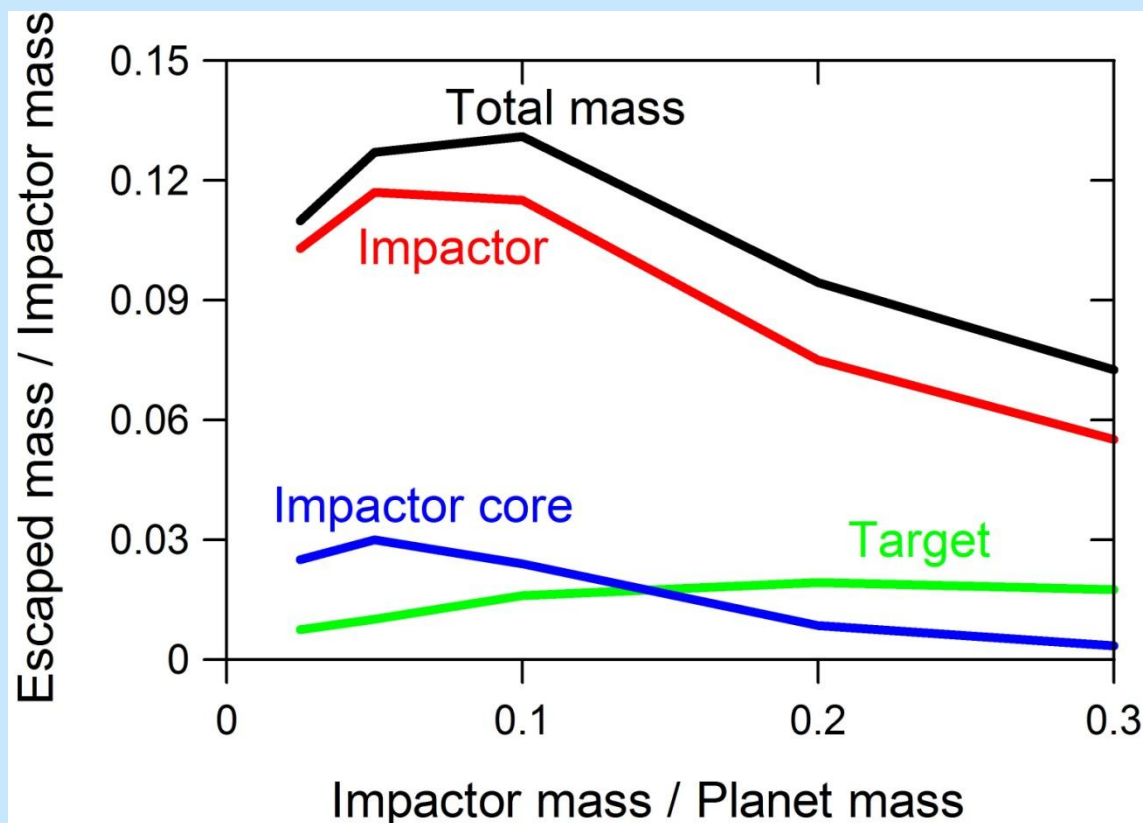
Крупное дифференцированное космическое тело сталкивается с растущей Землей, имеющей радиус 0.7 от современного. Показаны четыре момента времени. Диаметр ударяющего тела (ударника) составляет 0.3 от диаметра Земли. В момент удара скорость направлена под углом 50° к линии, соединяющей центры масс тел. На “бесконечности” скорость ударника 5 км/с. Масса “выбрасываемого” вещества составляет в 15% от массы ударника.

Относительная масса частиц, выброшенных на гелиоцентрические орбиты, в зависимости от угла удара для двух относительных размеров ударника δ



Осреднение по углам удара

Осредненная полная
относительная
масса частиц,
выброшенных на
гелиоцентрические
орбиты, как
функция
относительной
массы ударника



Численным моделированием ударов крупных тел о поверхность растущей планеты показано, что вещество, выброшенное на гелиоцентрические орбиты в результате ударов, обеднено железом, и его массы достаточно для формирования долунного роя тел, из которого образовалась Луна.

Таким образом, продемонстрирована непротиворечивость гипотезы образования Луны из вещества, выброшенного ударами о поверхность планеты.

