

Баренбаум А.А. (ИПНГ РАН)

**КУМУЛЯТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР
ГАЛАКТИЧЕСКИМИ КОМЕТАМИ
НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ**

**Забабахинские научные чтения - 2019
Снежинск – 18-22.03.2019**

Баренбаум А.А. (ИПНГ РАН)

КУМУЛЯТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ГАЛАКТИЧЕСКИМИ КОМЕТАМИ НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

План сообщения

- 1. Галактические кометы и их свойства.**
- 2. Физика взаимодействия ГК с планетами.**
- 3. Кумулятивный механизм кратерообразования.**
- 4. Примеры кумулятивных структур на планетах.**

Забабахинские научные чтения - 2019

Снежинск – 18-22.03.2019

Галактические кометы и их свойства

Галактические кометы

Гипотеза существования галактических комет
(межзвездных комет) – П. Лаплас (1796)

Два типа ГК: **1) струйных потоков,**
2) галактических рукавов

Параметры ядер ГК:

$$d = 100 - 3500 \text{ м;}$$

$$\rho = 1 \text{ г/см}^3;$$

$$m = 10^{12} - 10^{17} \text{ г}$$

$$V = 450 \text{ км/с}$$

$$E = 10^{20} - 10^{25} \text{ Дж}$$

Падения ГК носят характер «кометных ливней»

$$\Delta t = 1 - 5 \text{ млн. лет}$$

$$T = 20 - 37 \text{ млн. лет}$$

$$N = 10^5 - 10^7 \text{ комет}$$

За 1 бомбардировку на Землю поступает

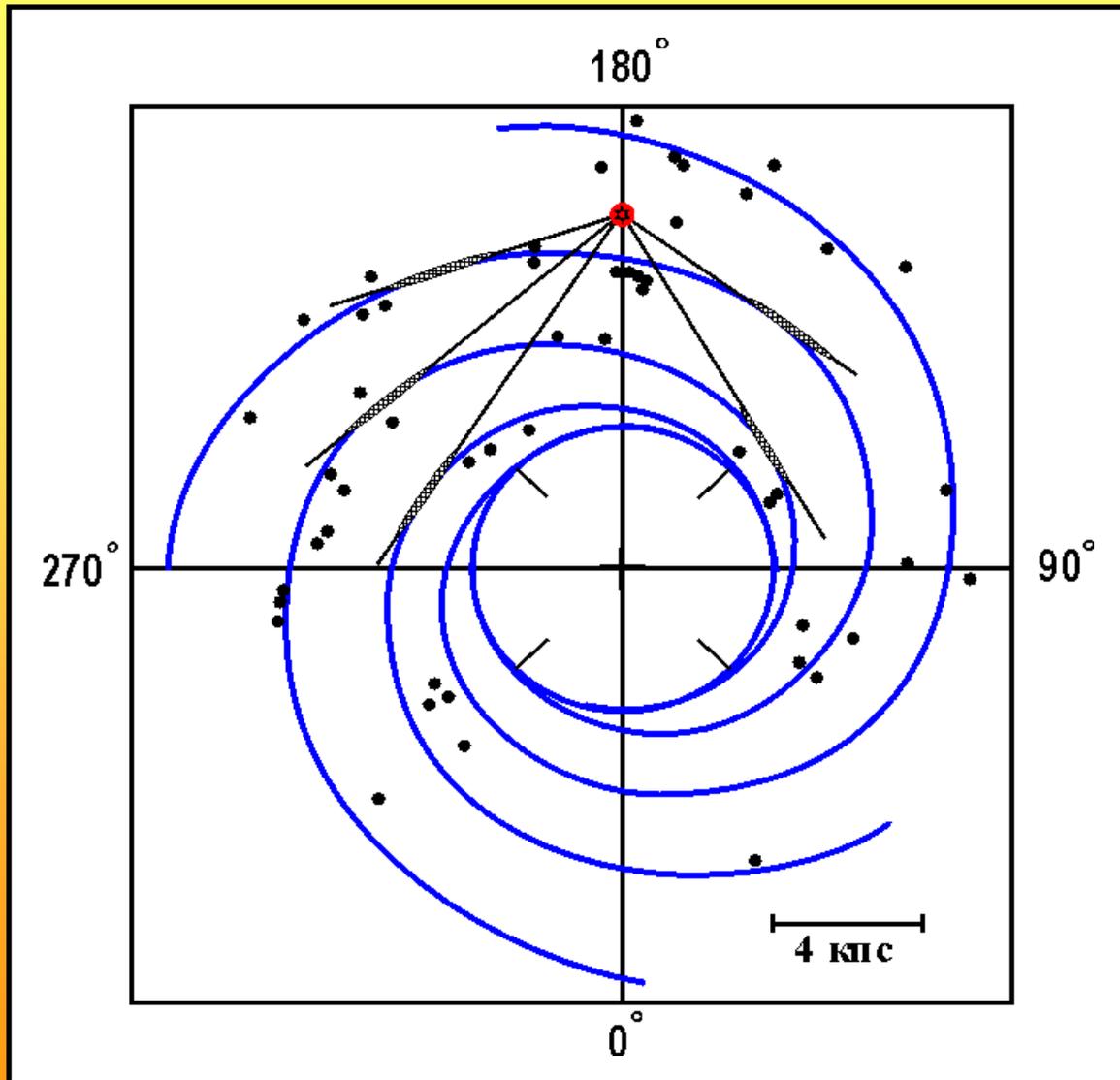
$$E = 10^{27} - 10^{28} \text{ Дж} - \text{энергии}$$

$$M \sim 10^{21} - 10^{22} \text{ г} - \text{вещества}$$

Происхождение галактических комет

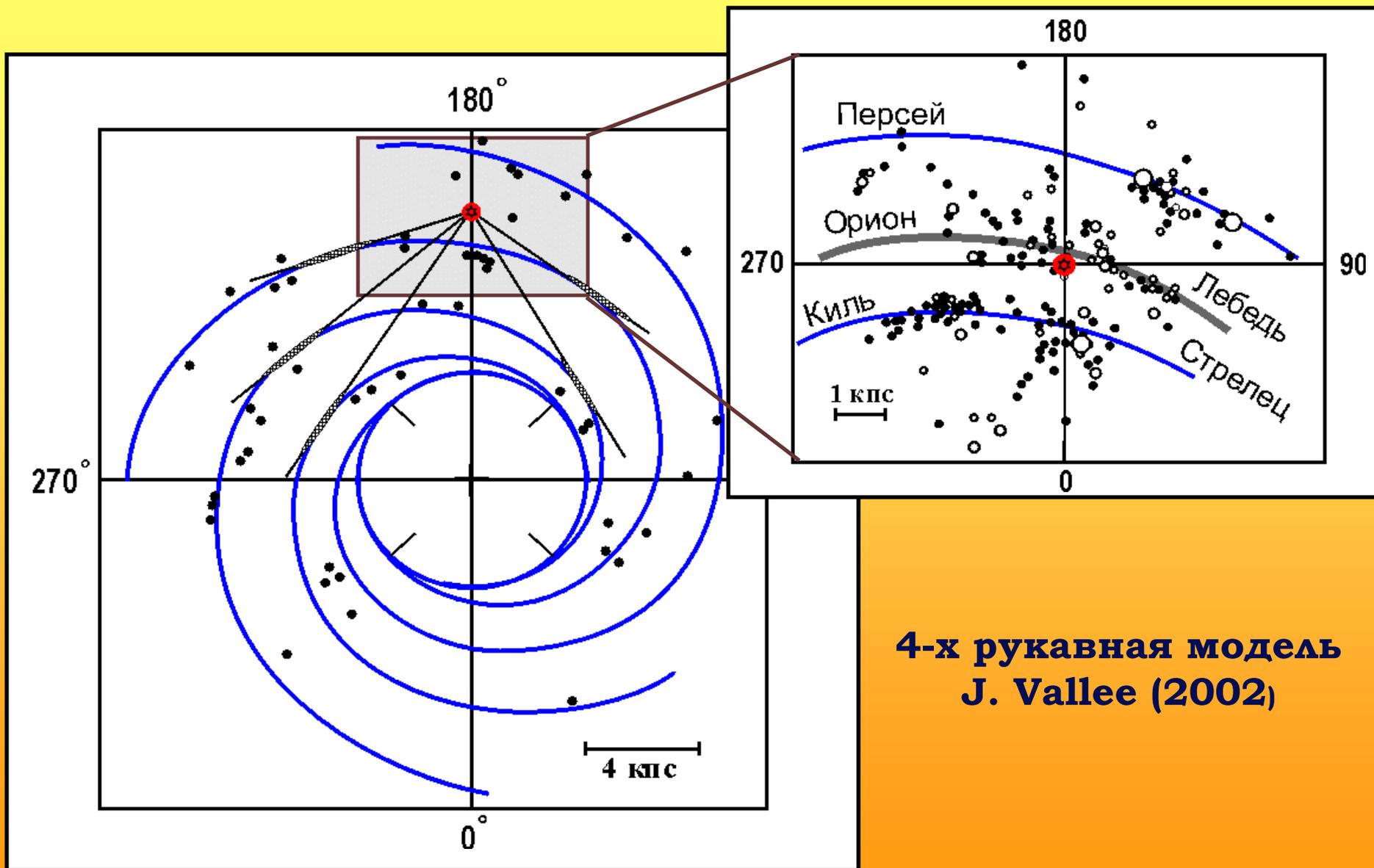
**Явление струйного истечения
Джинса-Каптейна**

Спиральная структура Галактики



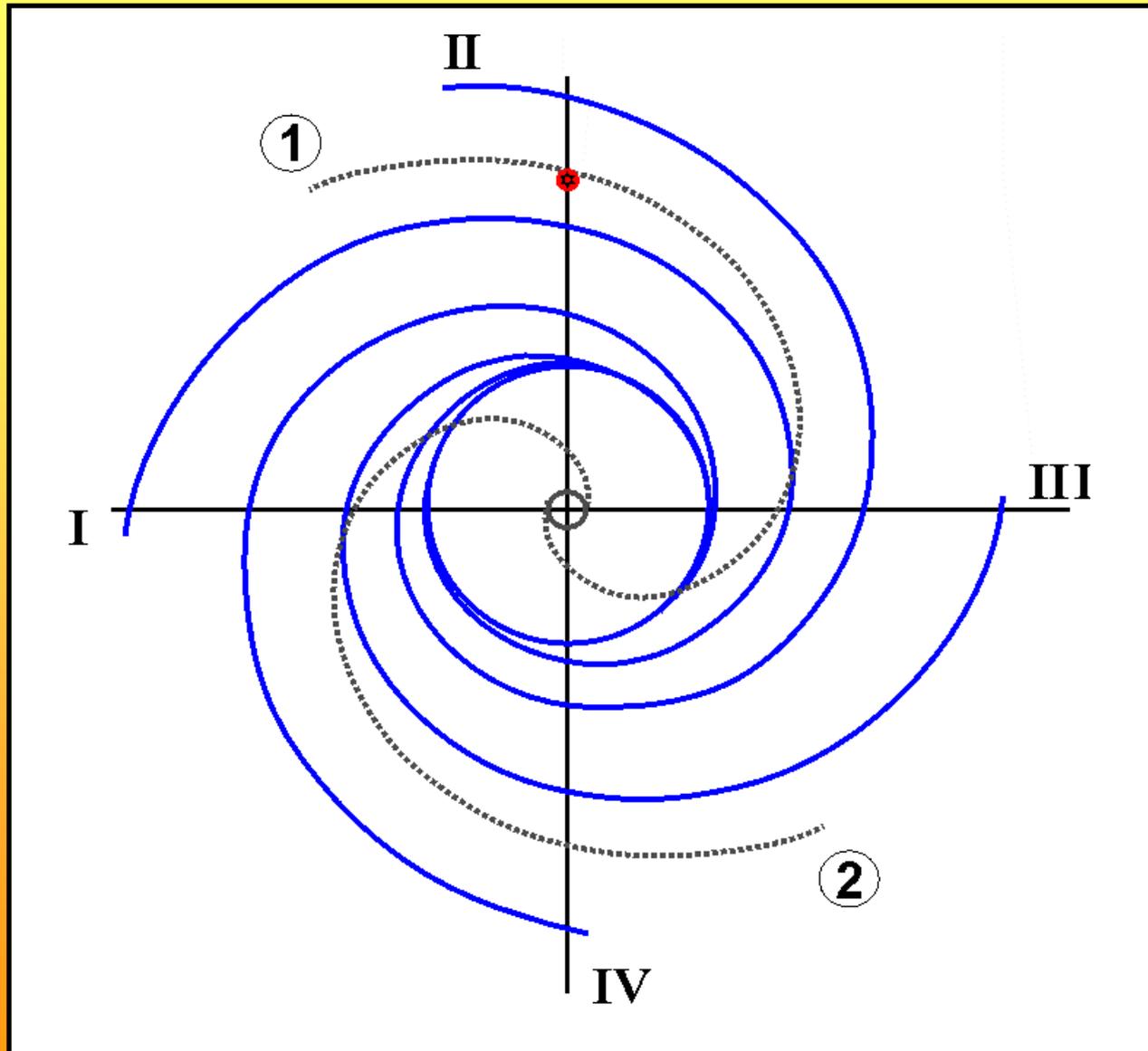
**4-х рукавная модель
J. Vallee (2002)**

Спиральная структура Галактики

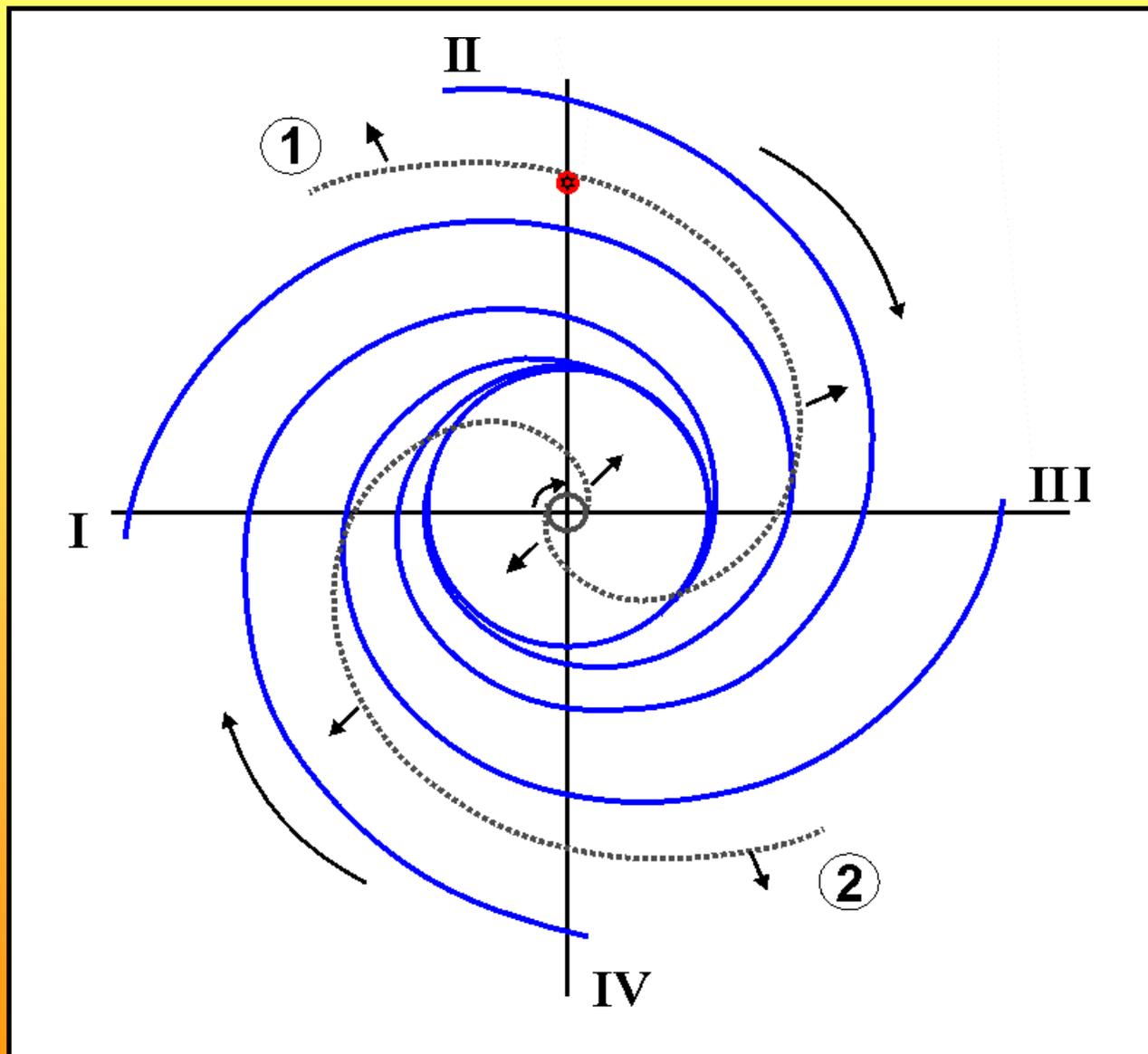


**4-х рукавная модель
J. Vallee (2002)**

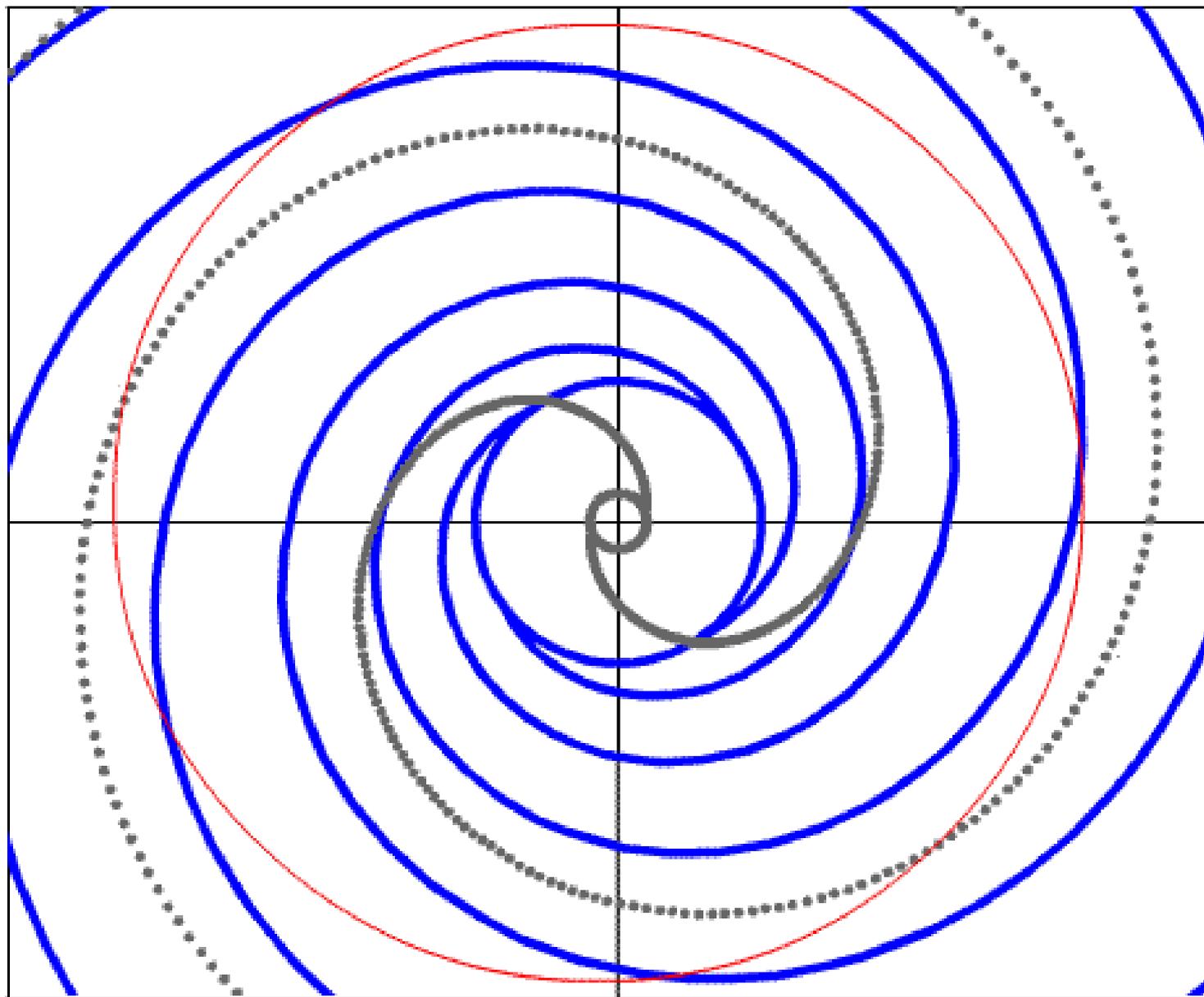
Двухспиральная модель Галактики



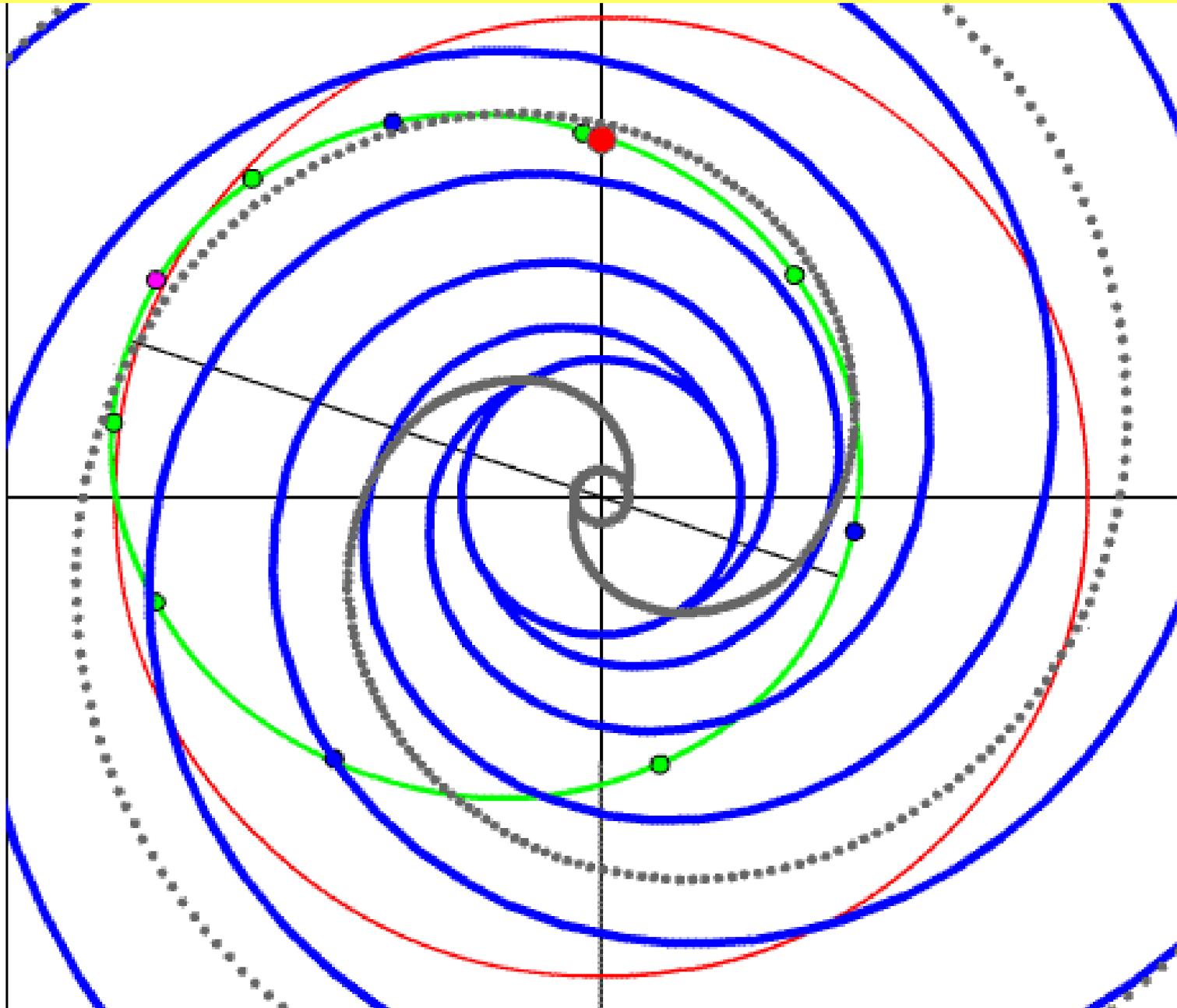
Двухспиральная модель Галактики



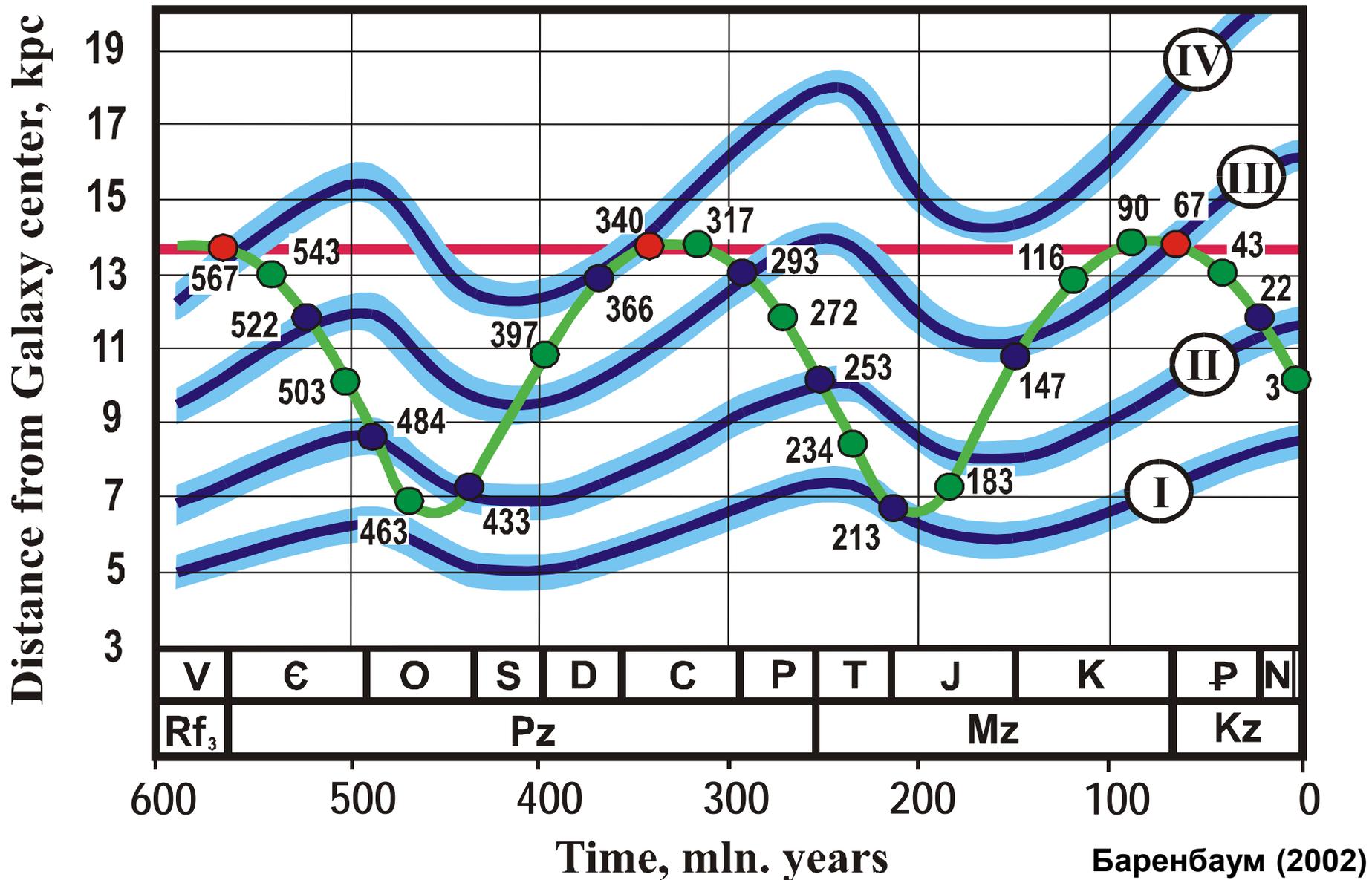
Динамическая модель спиральности Галактики



Галактическая модель геологической цикличности



Времена кометных бомбардировок



Вымирание семейств живых организмов по Сепкоски (1995) как индикатор интенсивности кометных падений

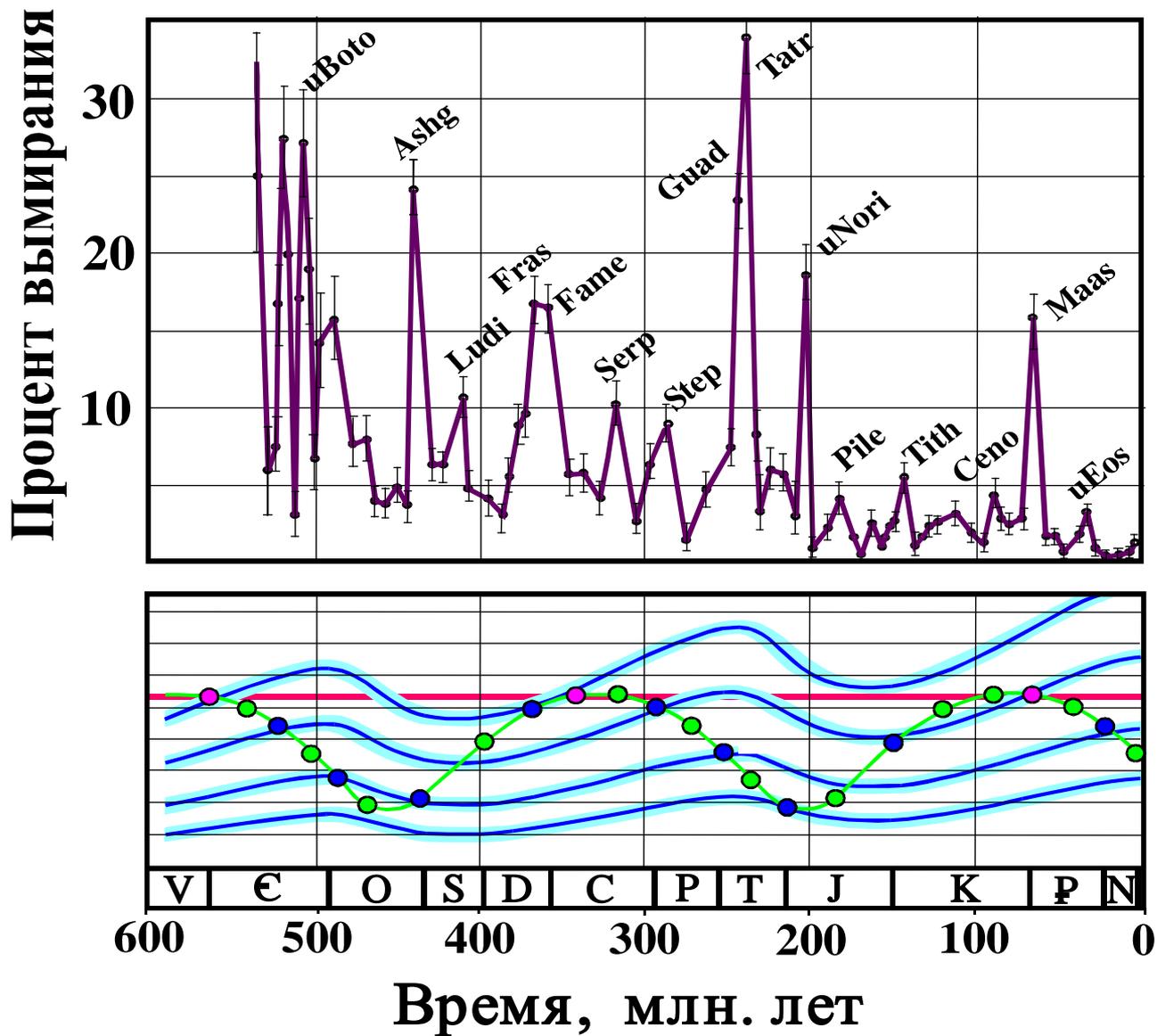
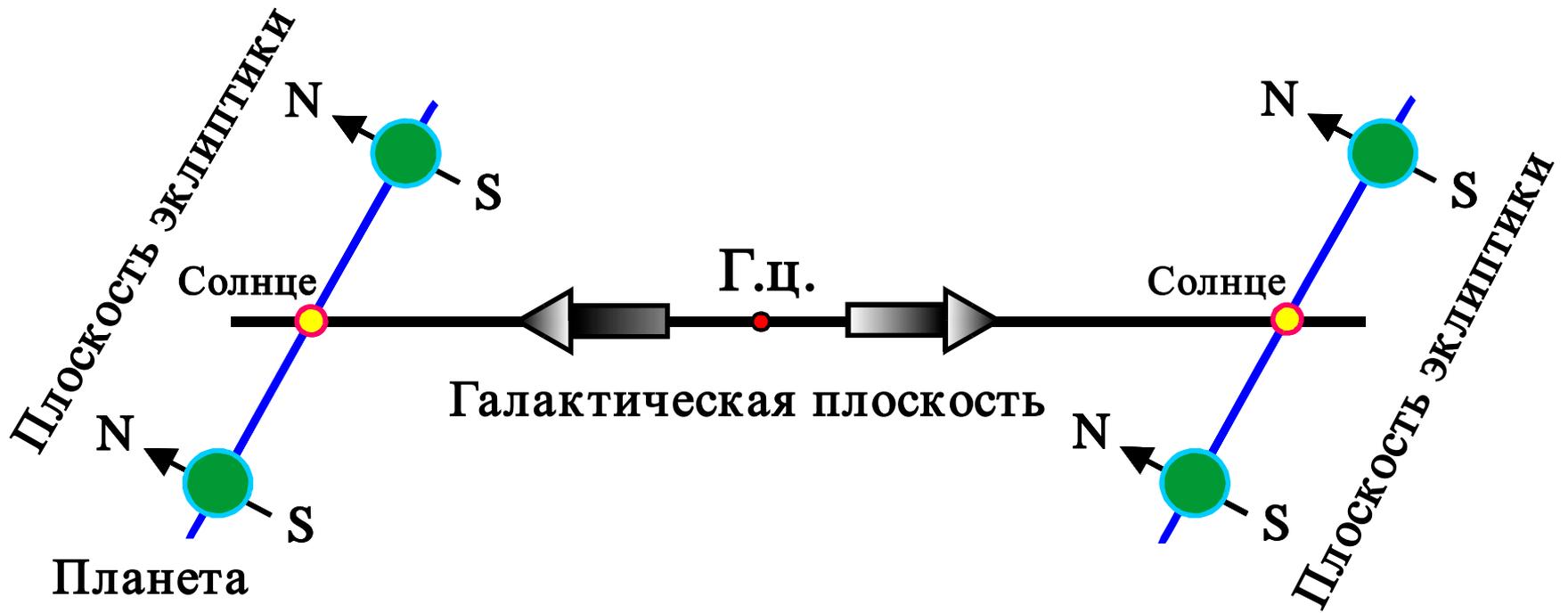


Схема падений галактических комет на планеты Солнечной системы



Влияние движения Солнца в Галактике на распределение плотности падений ГК по широтам земного шара

Расчет сводится к интегрированию формулы по φ в пределах от 0 до $\varphi_{\max} = -\text{tg}\vartheta \cdot \text{tg}\delta$, где φ_{\max} определяется из условия $I(\varphi_{\max}) = 0$.

$$I = I_0 \cos \varphi (\sin \vartheta \cdot \sin \delta + \cos \vartheta \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi)$$

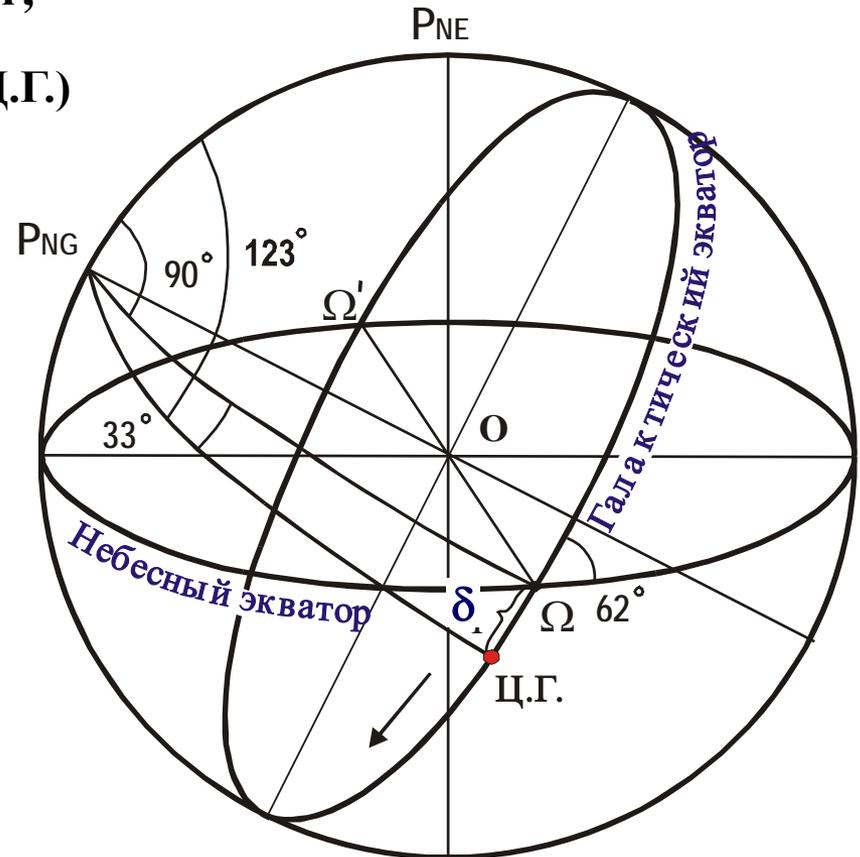
I_0 – плотность потока галактических комет;

$\delta(t)$ – склонение точки центра Галактики (Ц.Г.)

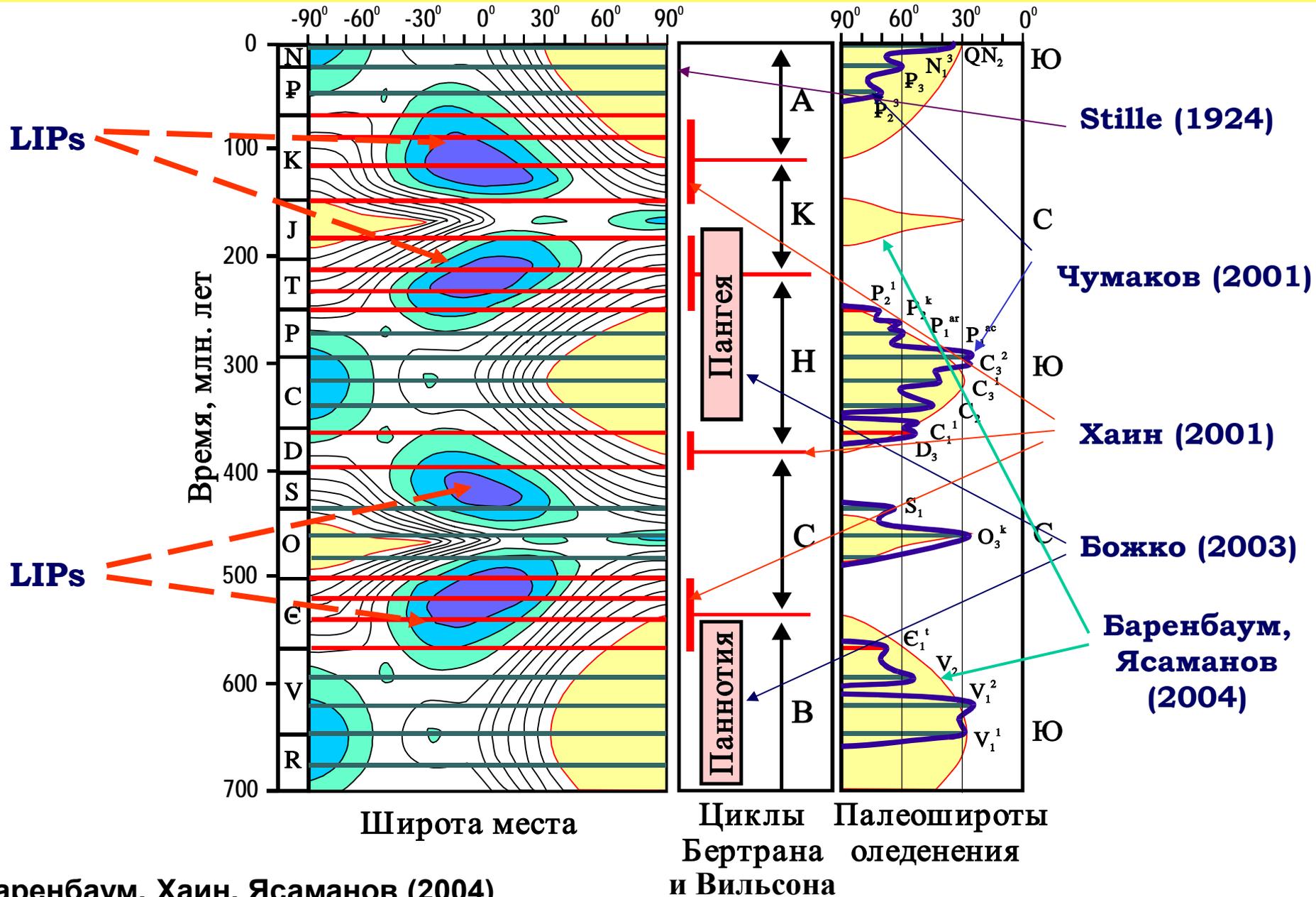
φ – часовой угол;

ϑ – широта места.

Для согласования с фактами предполагается прецессия плоскости эклиптики с периодом 2700 млн.лет, учитываемая как $\delta'(t) = \delta(t) + \omega \cdot t$, где ω - угловая скорость прецессии



Планетарные геодинамические и климатические процессы на Земле, вызванные падениями галактических комет



Феномен новейших поднятий земной коры

Синхронный подъем поверхности суши земного шара в период 5 - 1 млн. лет назад

Сильный подъем испытали (Артюшков (1994, 2012):

Центральная и Северо-восточная Азия, Африка, Западные части Северной и Южной Америк, Гренландия, Урал, Скандинавские Горы, Сибирская платформа, горы Альпийского пояса, Тибет, Гвианский и Бразильский щиты, Антарктида и др.

Высота поднятий:

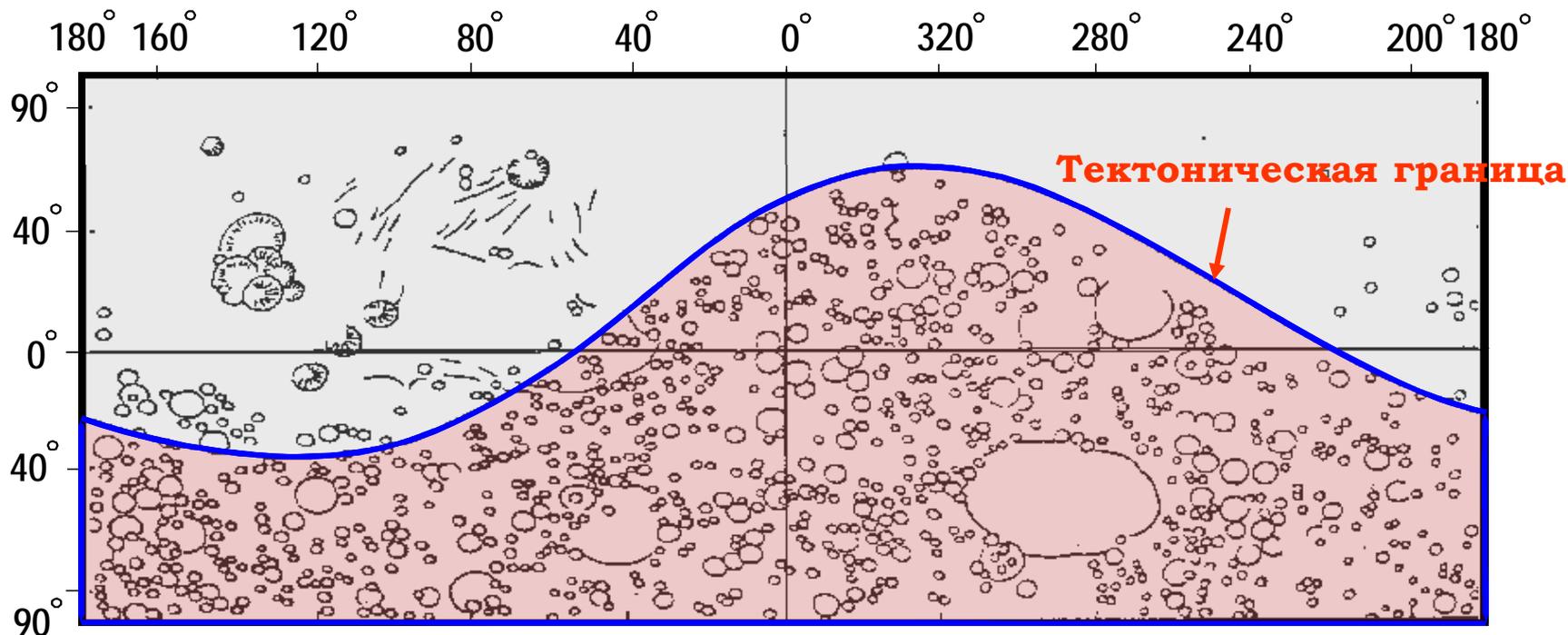
Большая часть побережья Тихого Океана	100-300 м
Сибирская платформа	200-1000 м
Южная Африка	300-1200 м
Аравийская платформа	2000 м
Альпы	3000 м
Гималаи	6000 м

Под большинством гор отмечен значительный подъем астеносферы, сопровождавшийся в ряде мест излиянием лав.

Требуемая энергия $\sim 10^{28}$ Дж

Карта рельефа поверхности Марса

Морское полушарие



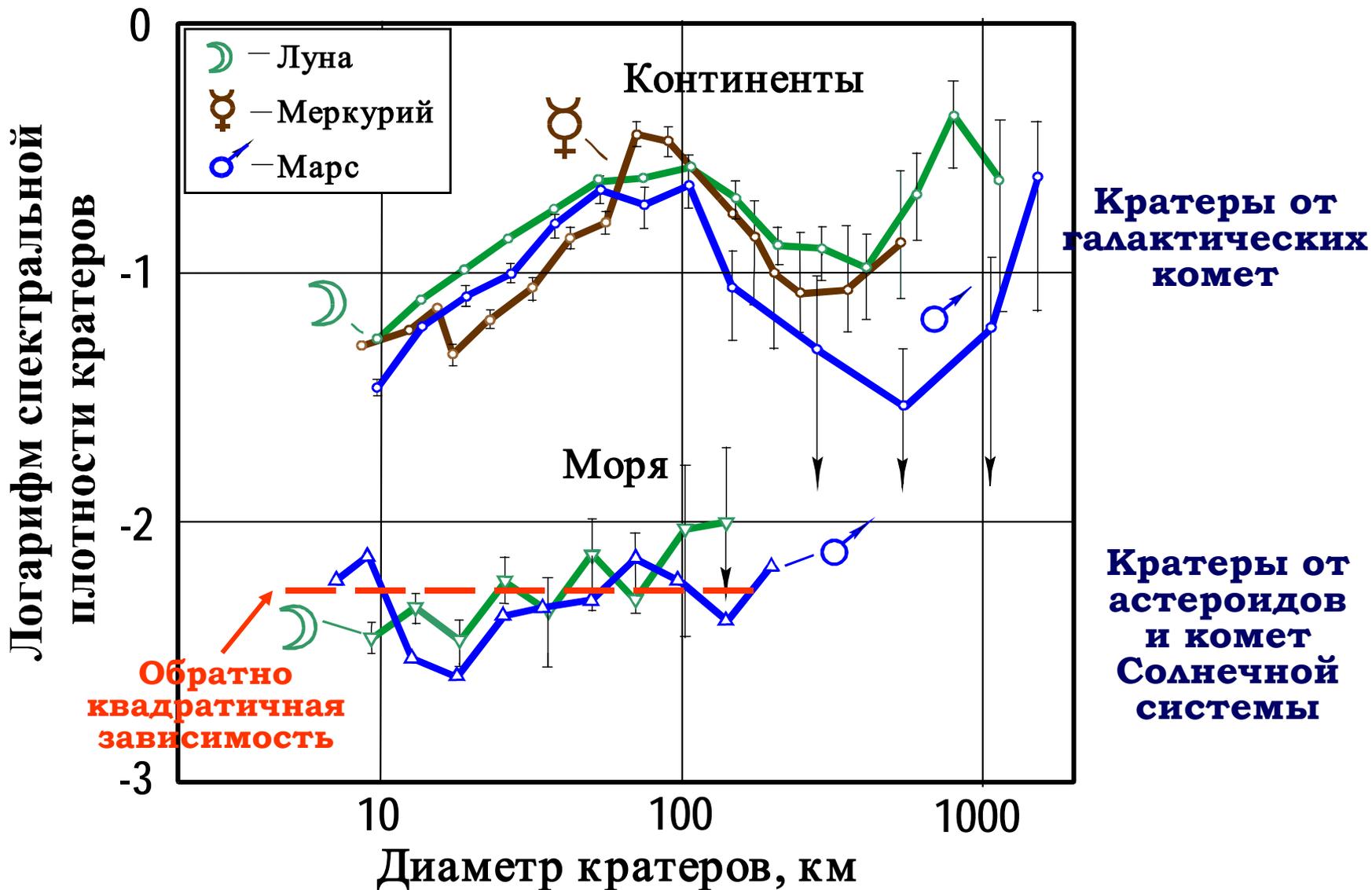
Континентальное полушарие

Южное «континентальное» полушарие сильно кратерировано и приподнято над северным «морским» полушарием на 2-6 км.

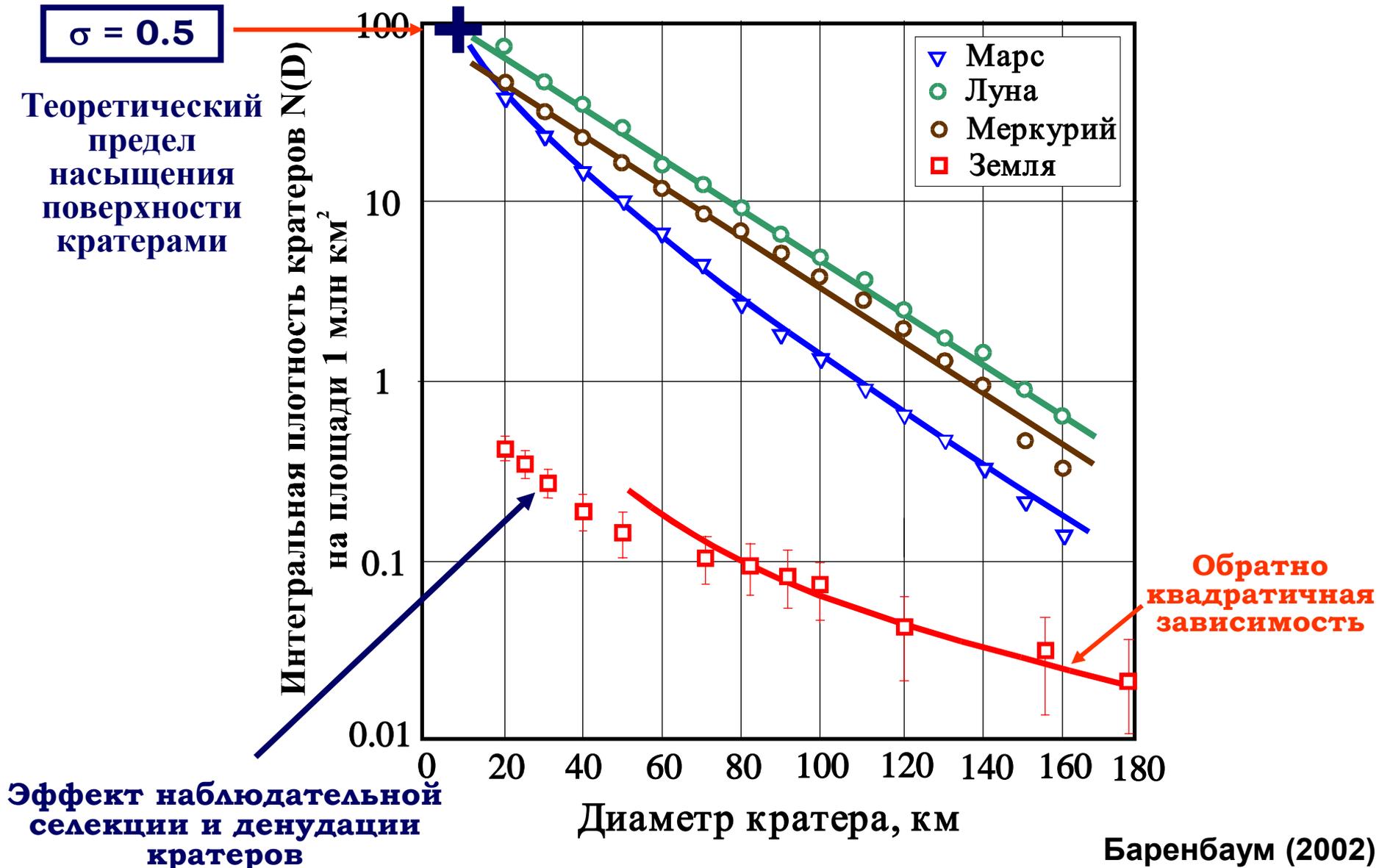
Тектоническая граница шириной ~ 300 км получается, как след сечения сферической поверхности Марса плоскостью, наклоненной к оси его вращения на угол 35 град (Казимиров, 1977)

Shaded relief map (1972)

Распределение кратеров по диаметрам на Луне, Марсе и Меркурии



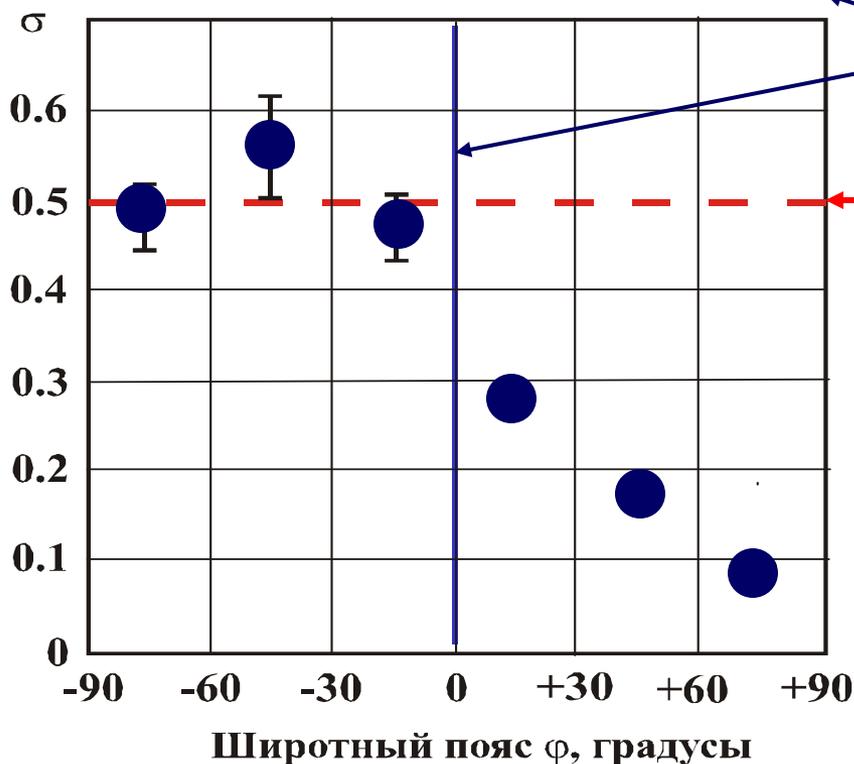
Интегральная плотность кратеров на Луне, Марсе, Меркурии и Земле



Насыщение поверхности Марса кратерами

Доля поверхности под астероидными и кометными кратерами

$\Delta\phi$	-90°... -60°	-60°... -30°	-30°... 0°	0°...+30°	30°...+60°	60°...+90°
σ_A	0.003	0.177	0.158	0.167	0.165	0.055
σ_K	0.483	0.392	0.313	0.110	0.022	0.034
$\sigma_{A+\sigma_K}$	0.486	0.569	0.471	0.277	0.187	0.089

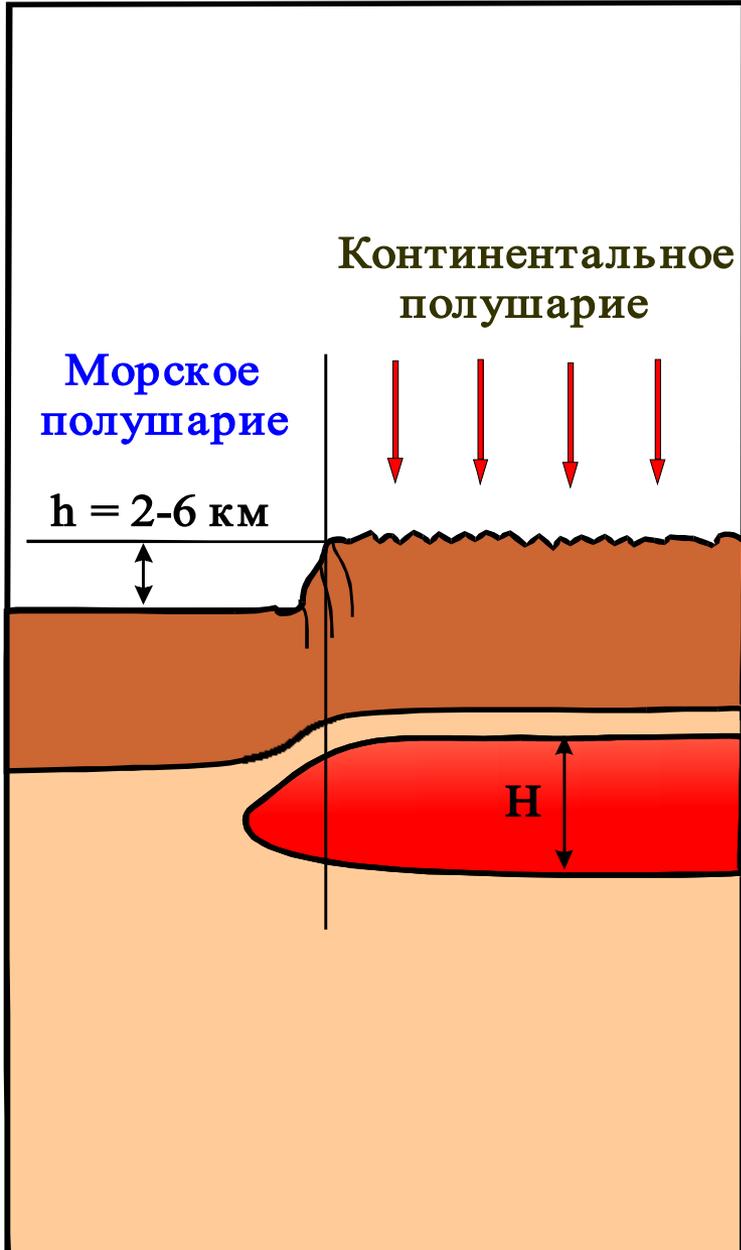


Тектонический экватор

Доля площади под кратерами при насыщении ими поверхности

Плотность падений в период последней бомбардировки ~ 500 комет на 1 млн. км кв.

Толщина астеносферного слоя



$$\Delta V = \beta V \Delta T + \xi V \left(\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right)$$

$$\xi \approx (1 \div 10)\%$$

$$h \cdot S = H \cdot S \left(\beta \Delta T + \xi \left(\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right) \right)$$

$$H = \frac{h}{\beta \Delta T + \xi \left(\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right)}$$

$$H = \frac{4 \text{ км}}{1.5 \cdot 10^{-2} + 0.22(1 \div 10) \cdot 10^{-2}} \approx 100 \div 250 \text{ км}$$

**Физика взаимодействия
галактических комет
с планетами**

Физика взаимодействия галактических комет с планетами

Требуется теоретически объяснить:

- 1. Отсутствие кратеров от ГК на Земле;**
- 2. Подъем поверхности континентов под действием падений ГК.**

Феноменологические модели

М.А. Лаврентьева первого приближения

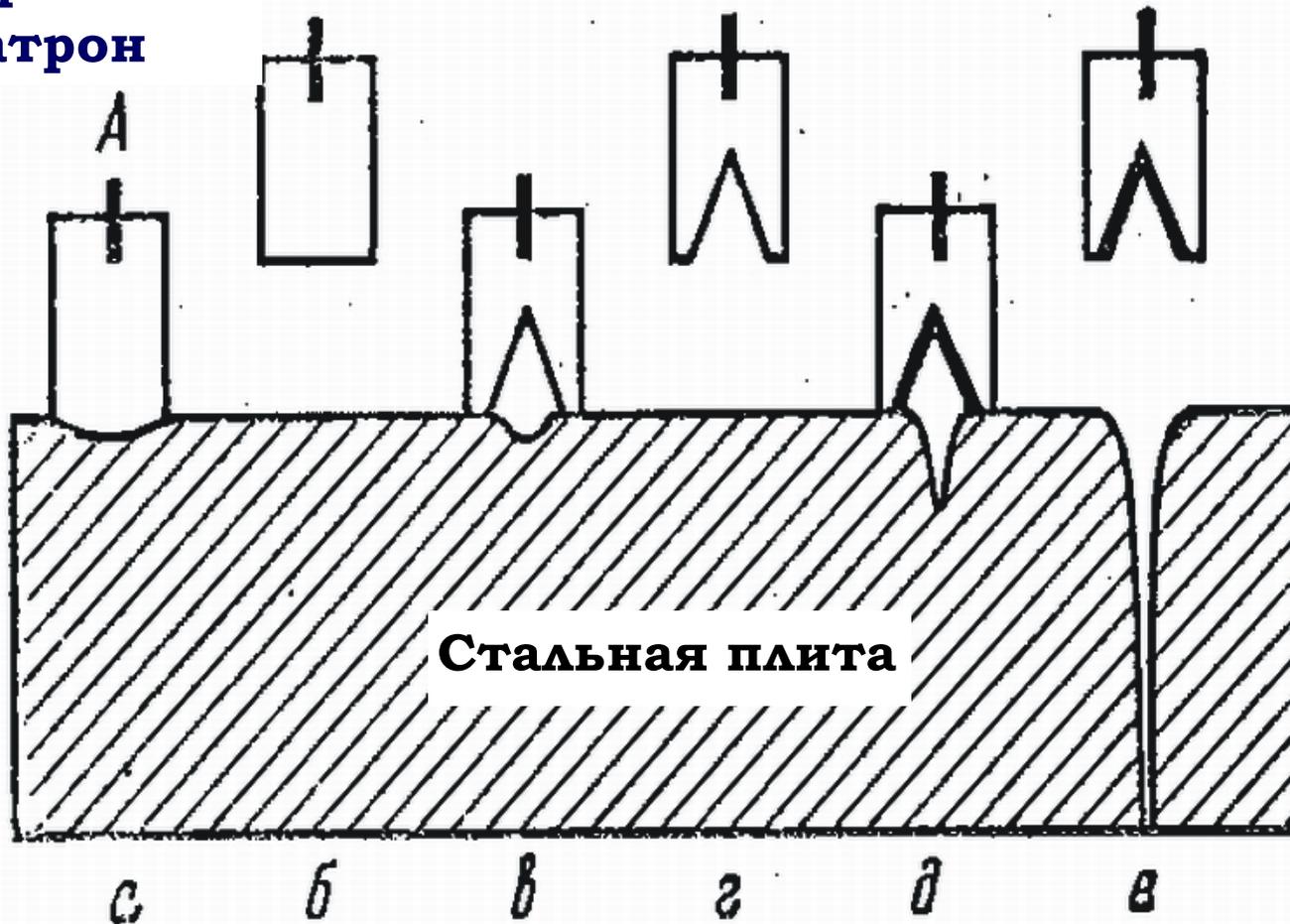
«упругого» и «неупругого» столкновения

тел при космических скоростях

Модель «УПРУГОГО» взаимодействия

Эксперименты М.А. Лаврентьева (1957)

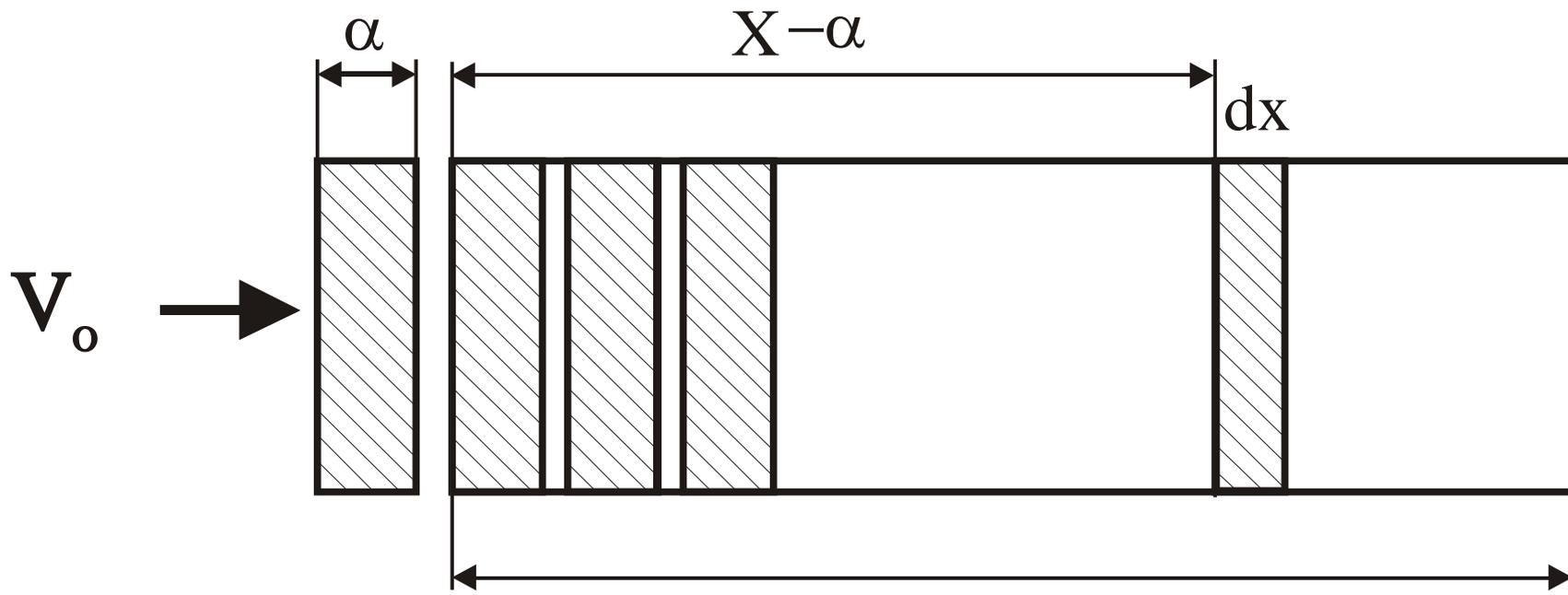
подрывной
патрон



Кумулятивный эффект

Модель «НЕУПРУГОГО» взаимодействия

Формулировка задачи М.А. Лаврентьевым (1959)



**Тонкие пластины
из несжимаемого
материала**

Механизм нагрева ударной волной

Два механизма взаимодействия ГК с планетами

1. «Упругий» механизм реализуется на планетах без атмосферы (**Меркурий, Луна**) или с разреженной атмосферой (**Марс**).

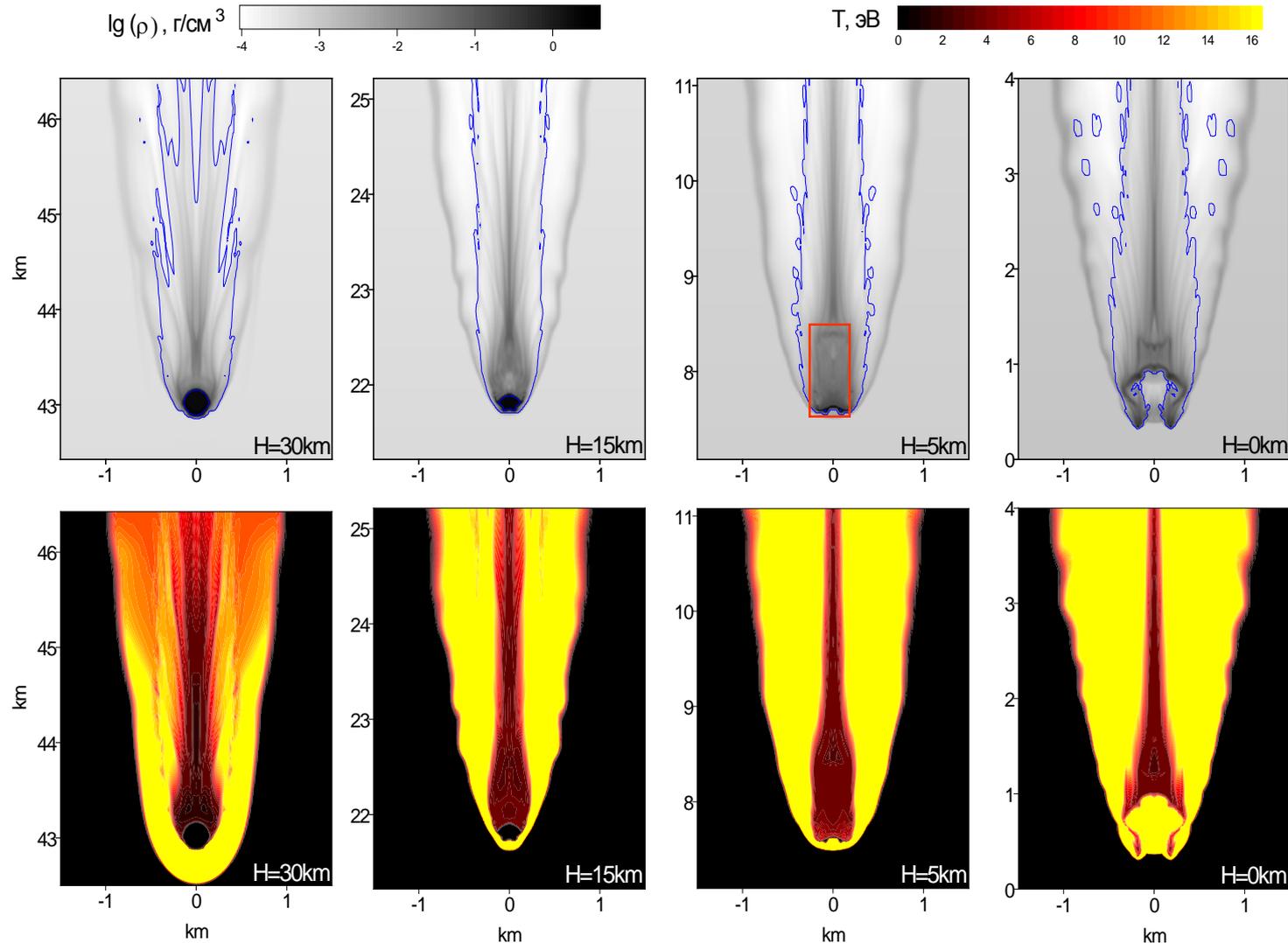
При этом механизме основная кинетическая энергия комет расходуется на механическое формирование кратерной воронки.

2. «Неупругий» механизм реализуется на планетах с плотной газовой оболочкой (**Земля и Венера**). Этот механизм носит трех стадийный характер. При нем энергия кометы передается гиперзвуковой ударной волне, которая глубоко проникает в породы литосферы, вызывая их испарение, плавление и нагрев.

ЗЕМЛЯ

**Механизм взаимодействия
галактических комет с Землей
как трех стадийный процесс**

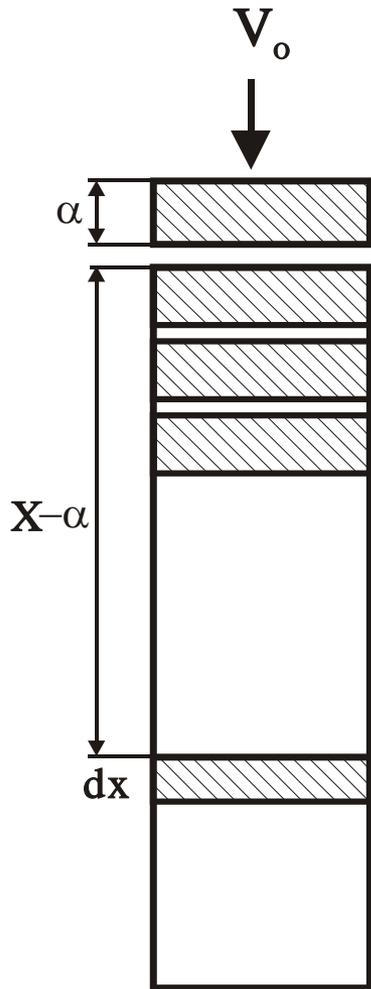
1 Стадия: превращение ГК в атмосферу в газовую струю



Разрушение кометы диаметром 300 м, падающей со скоростью 450 км/с под углом 45° . Показаны распределения плотности (десятичный логарифм плотности, выраженной в г/см^3) и температуры (эВ) на разных высотах H . На вертикальной оси указано расстояние вдоль траектории. Синяя линия – граница между парами кометы и воздухом.

2 Стадия: нагрев пород струей кометных газов

Теоретическая модель М.А. Лаврентьева (1957)



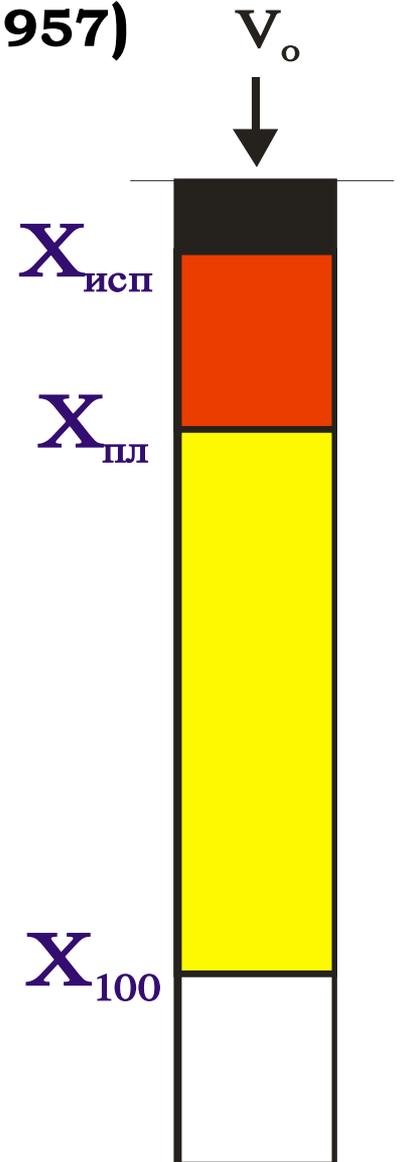
$$(1) \quad x \cdot dV + V \cdot dx = 0$$

$$(2) \quad V(x) = V_0 \frac{\alpha}{x}$$

$$(3) \quad E(x) = \frac{xV^2}{2} = \frac{E_0}{x}$$

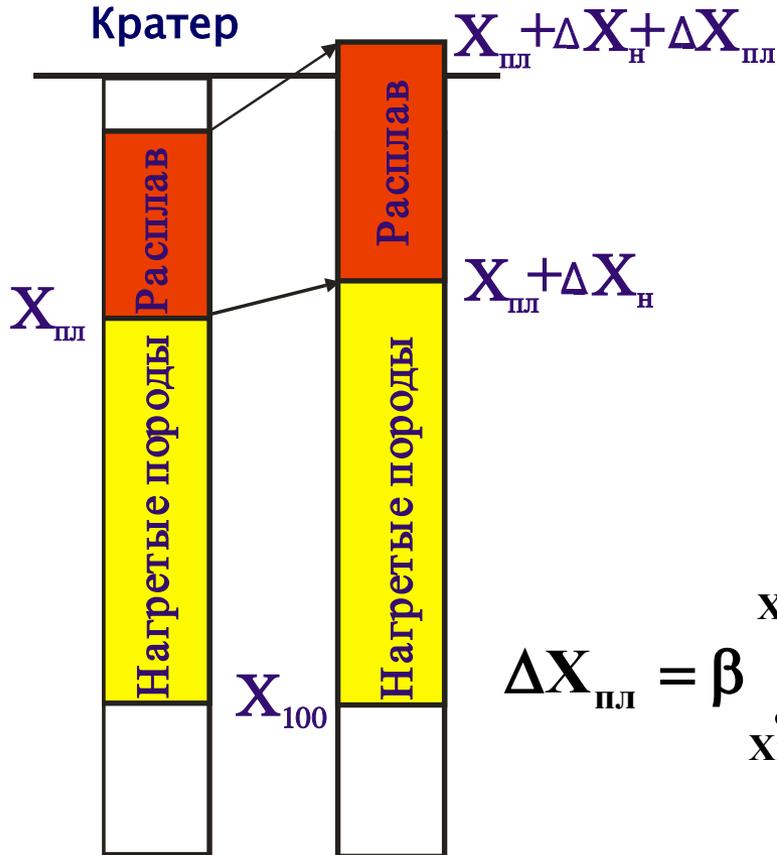
$$(4) \quad U(x) = -dE / dx = \frac{E_0}{x^2}$$

$$(5) \quad X_{кр} = \sqrt{\frac{E_0}{U_{кр}}}$$



3 Стадия: стадия модификации колонны нагретого вещества

Расширение столба пород при плавлении и нагреве

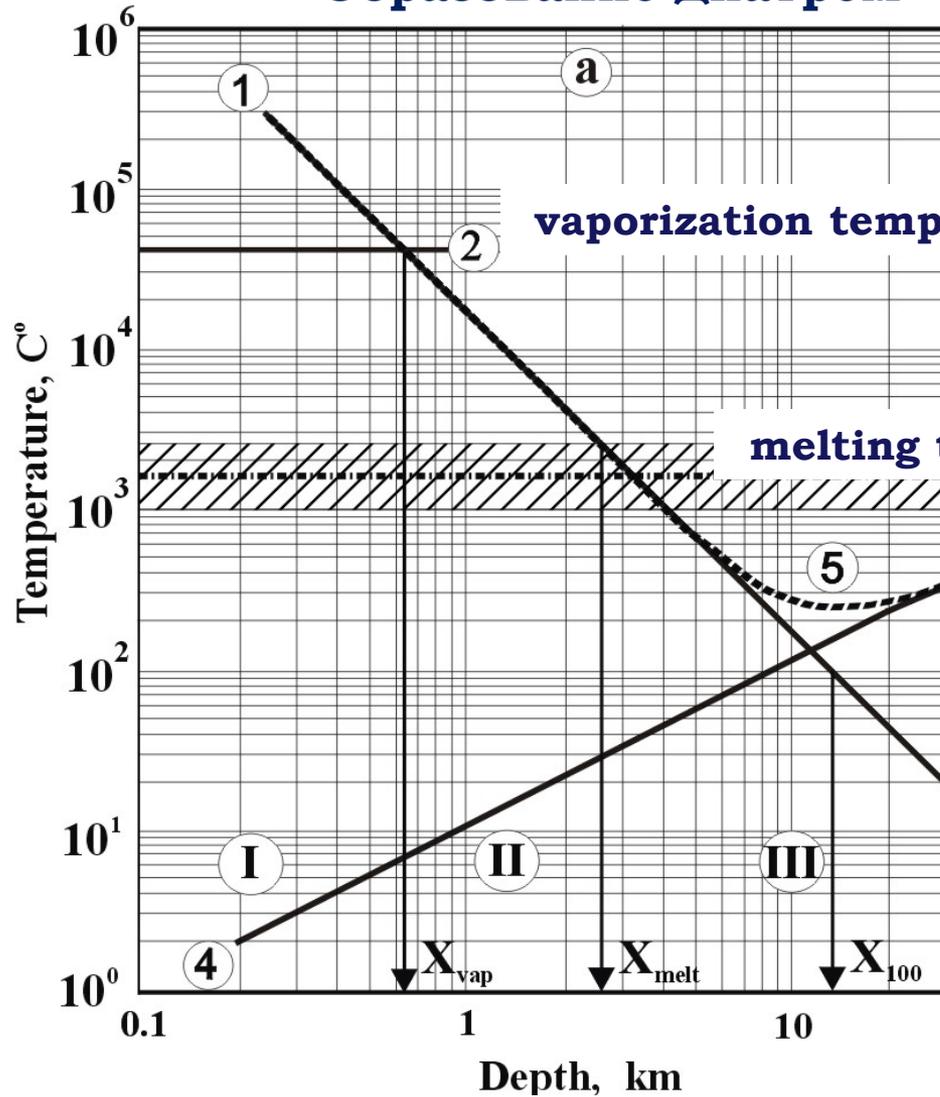


$$\Delta X_{\text{н}} = \beta \int_{X_{\text{пл}}}^{\infty} T(x) dx = \beta T_{\text{пл}} X_{\text{пл}} \quad (6)$$

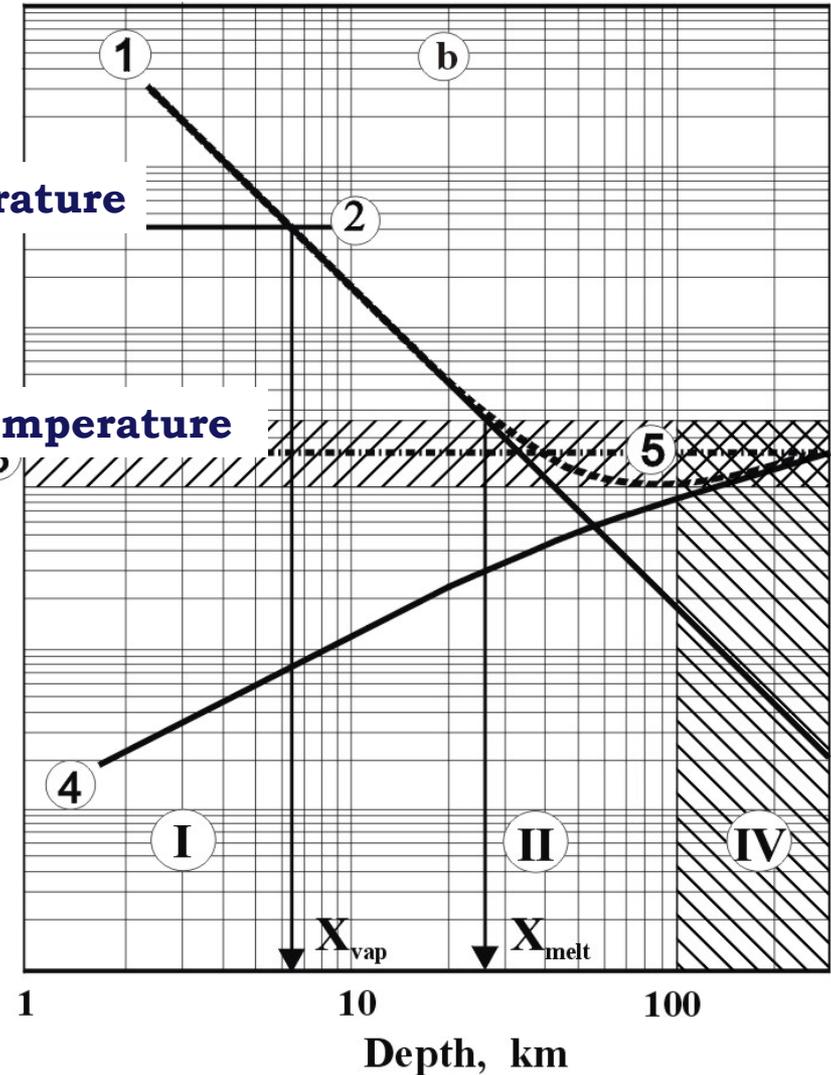
$$\Delta X_{\text{пл}} = \beta \int_{X_{\text{исп}}}^{X_{\text{пл}}} T(x) dx = \beta T_{\text{исп}} X_{\text{исп}} (1 - X_{\text{исп}} / X_{\text{пл}}) \quad (7)$$

Нагрев пород кометами диаметром 300 м (a) and 3 км (b)

Образование диатрем



Образование плюмов



asthenosphere

- ① – температура нагрева пород ударной волной
- ④ – естественный рост температуры с глубиной

Подтверждение механизма нагрева пород галактическими кометами в лазерных экспериментах

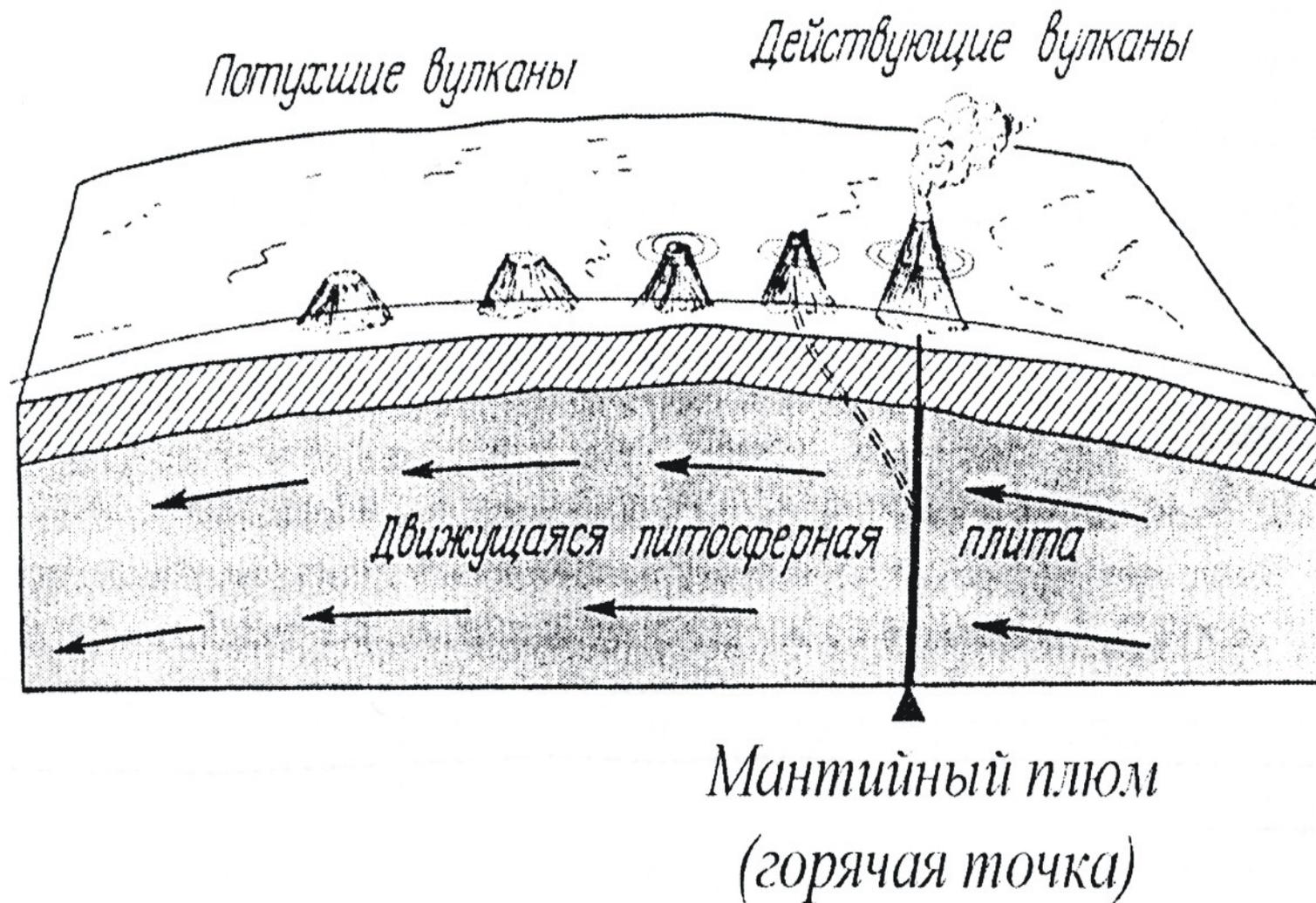
Наиболее мощный технический СО - лазер

Энергия в импульсе Q	$\sim 1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}$
Диаметр луча d	$\sim 1 \text{ мм}$
Плотность энергии на мишени Q/d^2	$\sim 10^8 \text{ (Дж/см}^2\text{)}$
Глубина отверстия $Z_{\Delta} = Q / (\pi \lambda d^2 T_{\text{исп}})$	$\sim 1 \text{ см}$

Галактические кометы

Энергия галактической кометы	$\sim 10^{20} \div 10^{25} \text{ Дж}$
Диаметр ядра галактической кометы	$\sim 100 \text{ м} \div 3.5 \text{ км}$
Плотность энергии на мишени Q/d^2	$\sim 10^{12} \div 10^{14} \text{ (Дж/см}^2\text{)}$
Глубина кратера $Z_{\text{к}} = Q / (\pi \lambda d^2 T_{\text{исп}})$	$\sim 100 \text{ м} \div 10 \text{ км}$

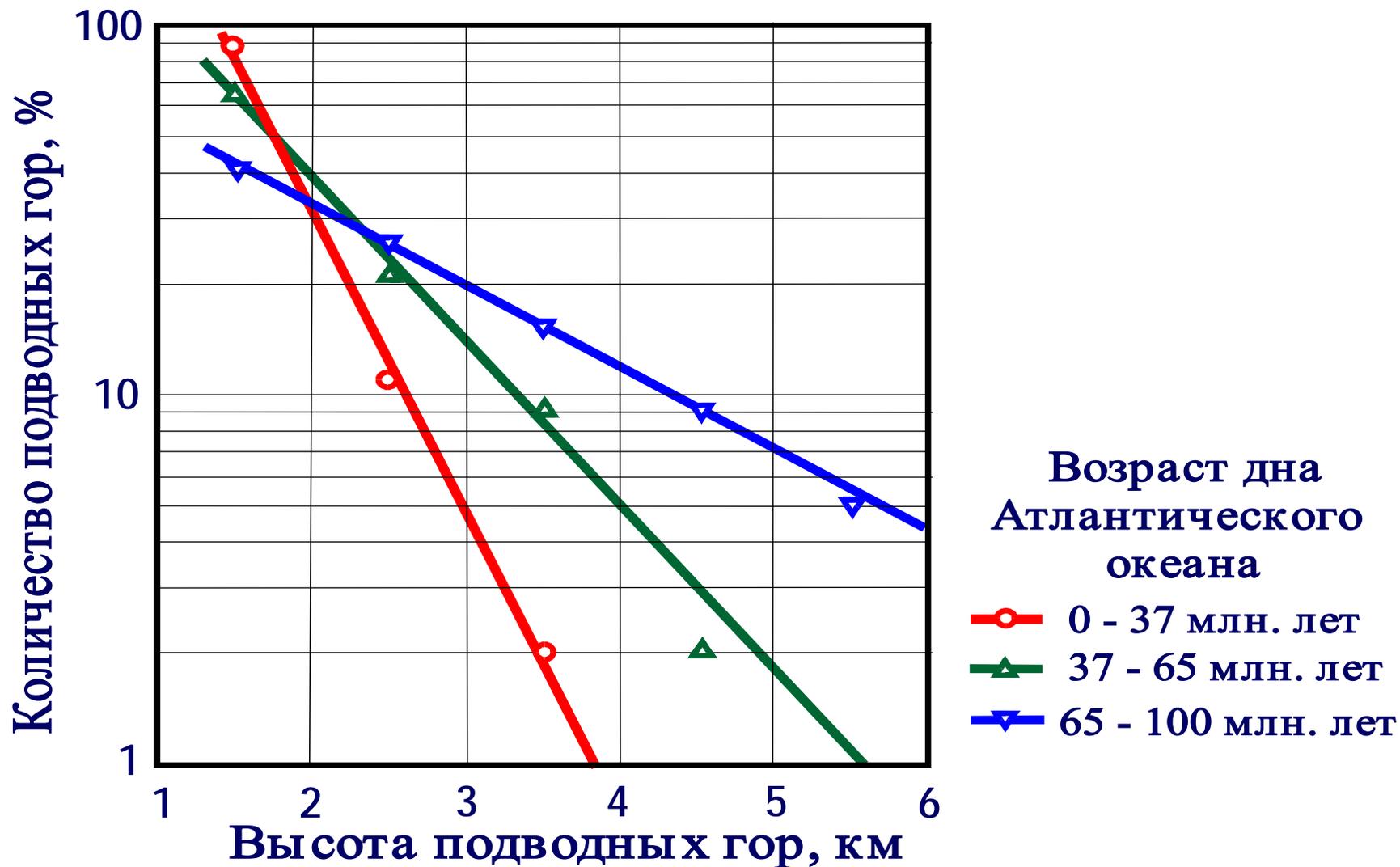
Образование подводных хребтов - эффект горячей точки



**Глубокое залегание одиночной магматической камеры.
Предположительно создаются галактическими кометами
с энергией 10^{25} Дж и более.**

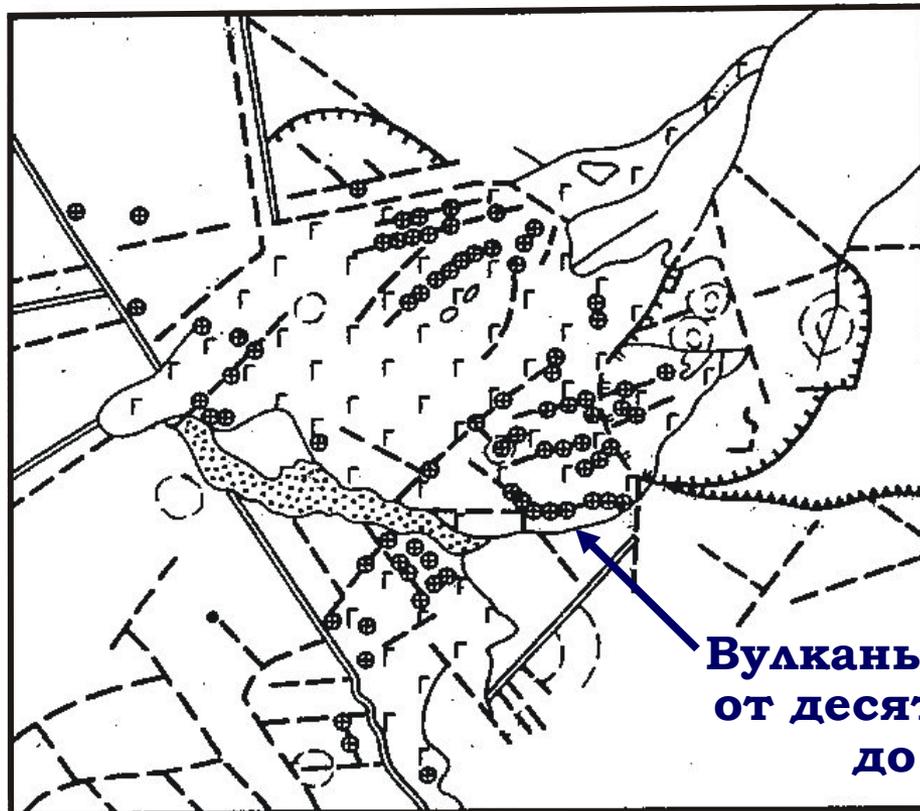
Неглубокое залегание магматической камеры – эффект роста подводных гор при спрединге океанских плит

Распределение подводных гор Атлантического океана по высотам



Диатремовые поля над астеносферными линзами

Плато Дариганга в Монголии,
базальты плиоценового возраста



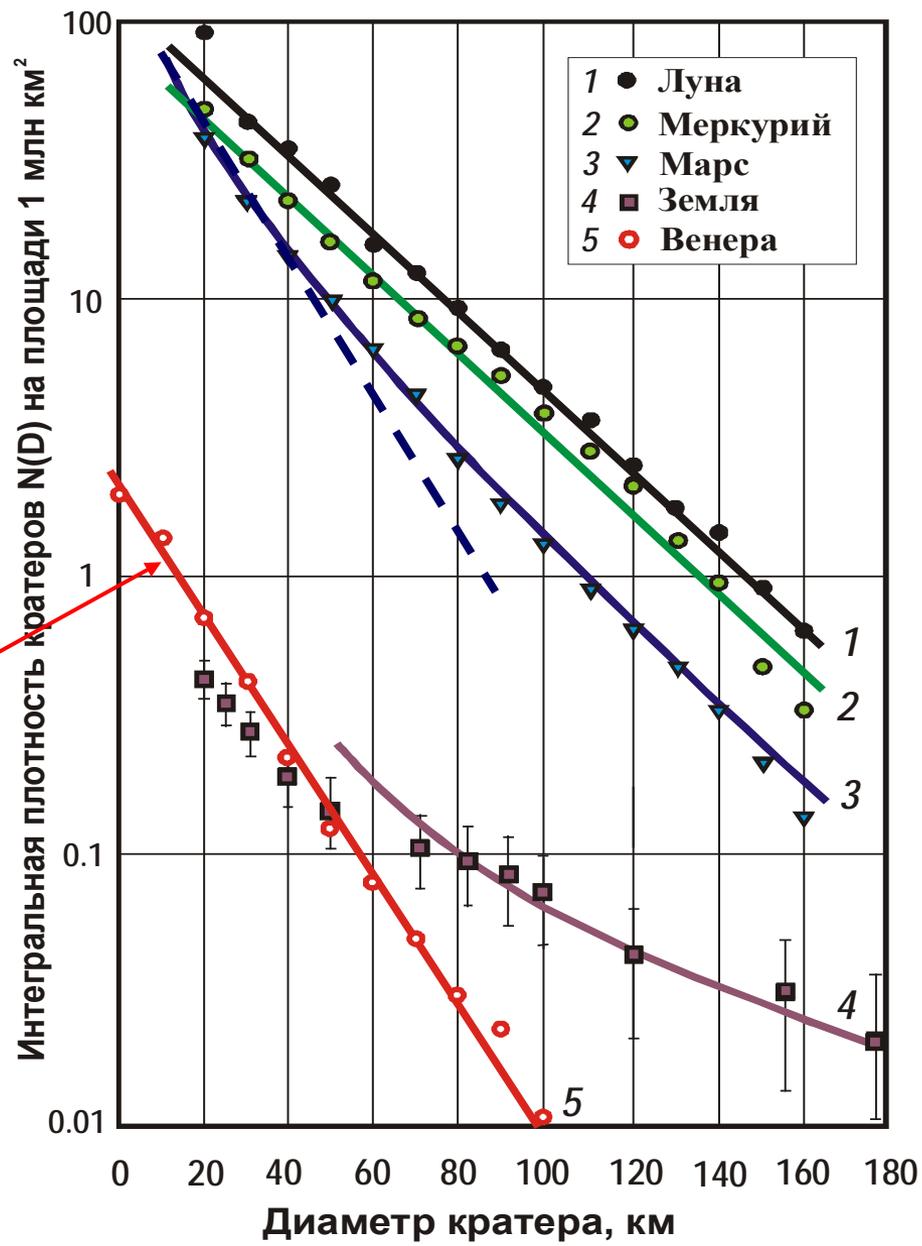
Ангаро-Илимский железорудный
район, триасовый магматизм



ВЕНЕРА

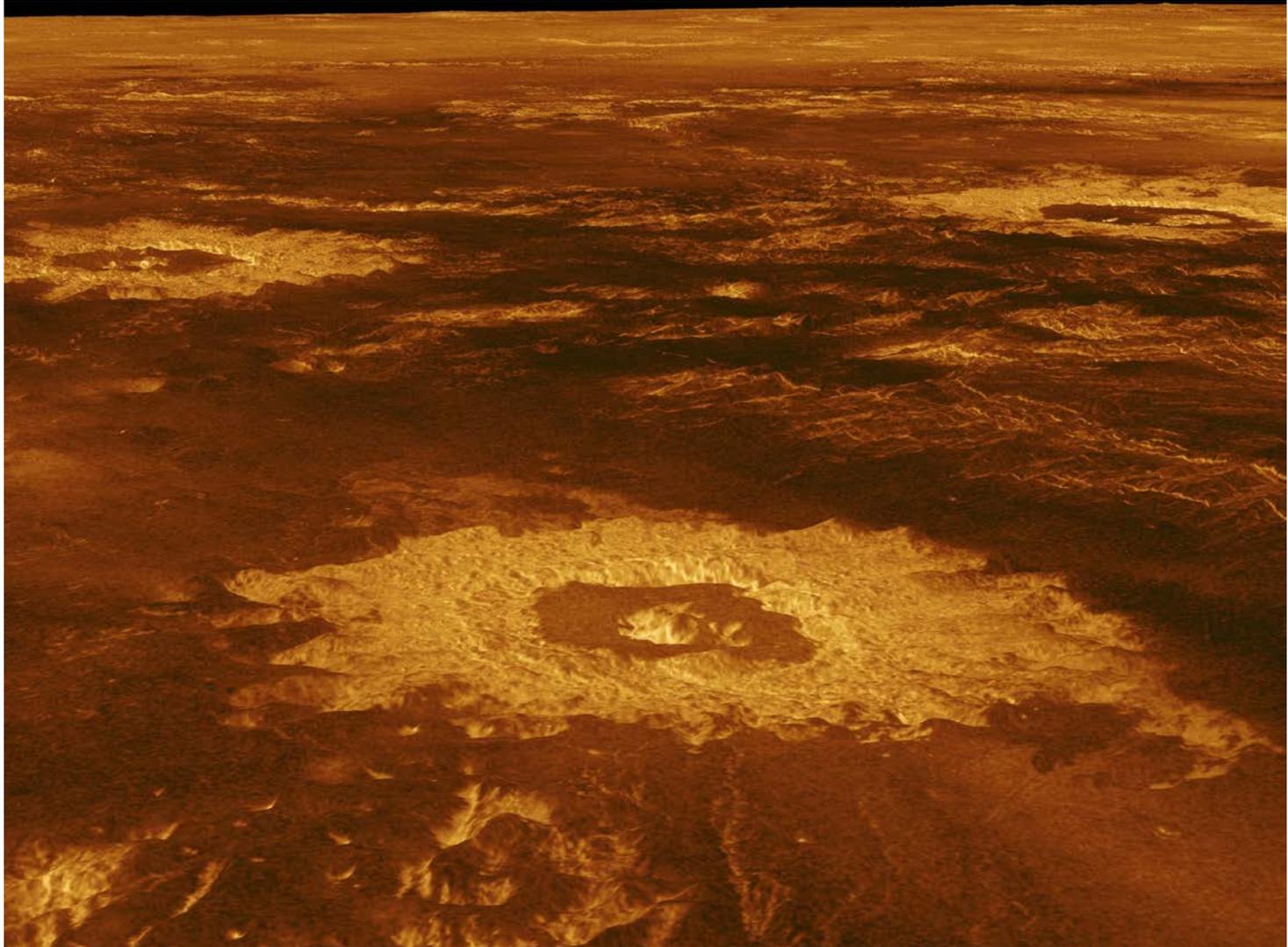
Атмосфера в 93 раз плотнее, чем на Земле
Температура поверхности 475 С:

Интегральная плотность кратеров на Луне, Марсе, Меркурии Земле и Венере



диатремы

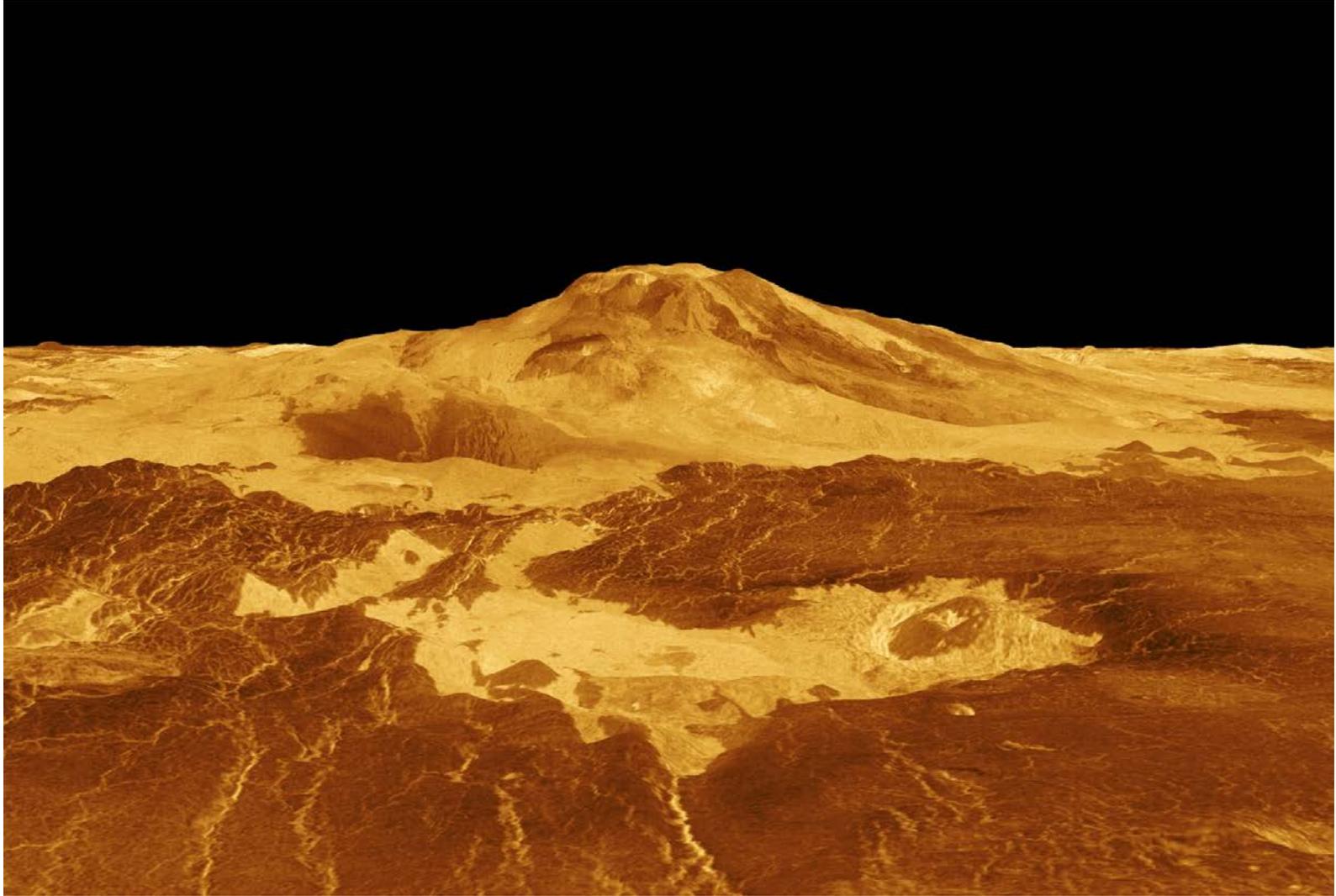
Кратеры на Венере



Диатремы

Одиночные эффекты

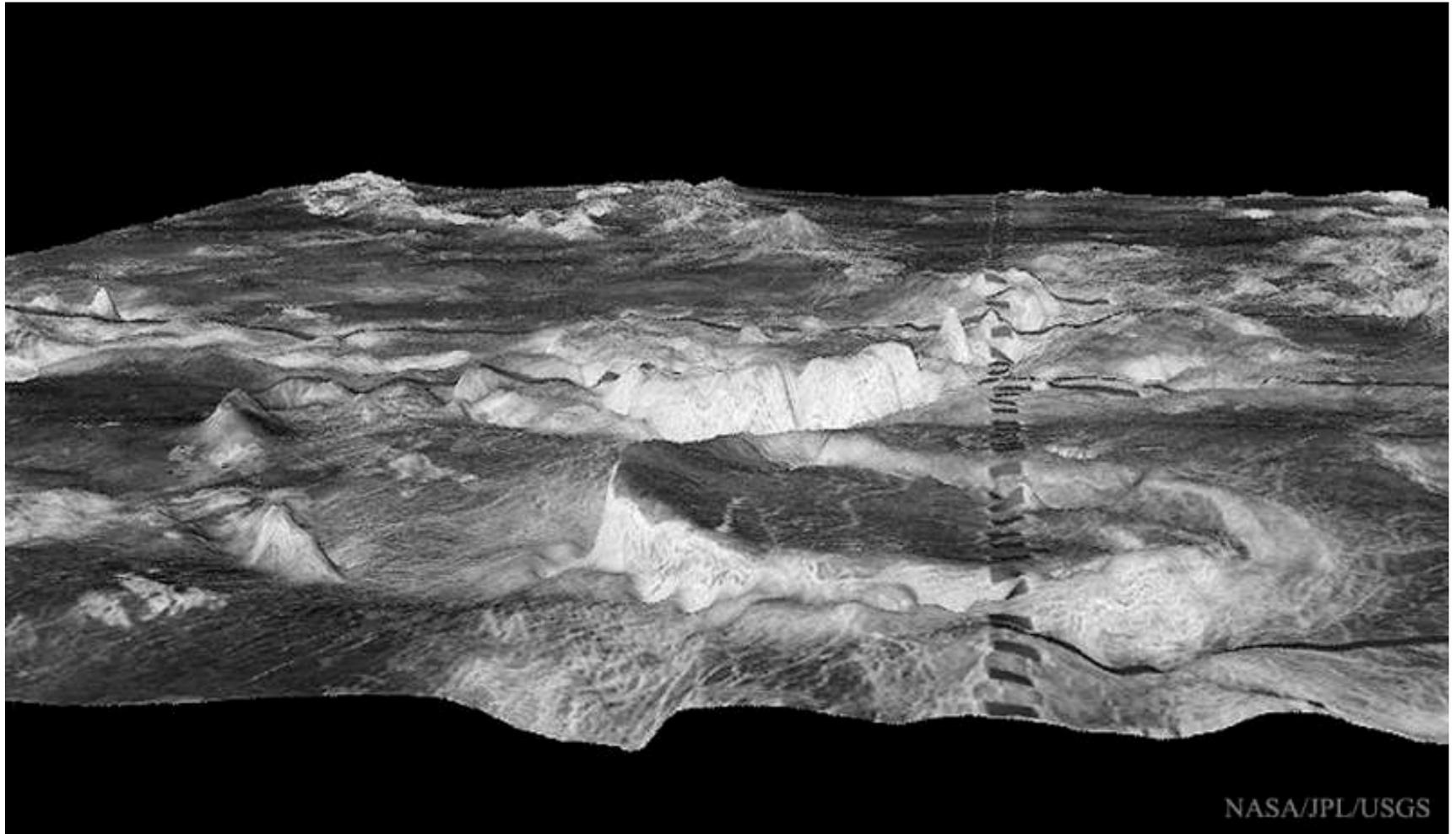
Монсы на Венере



Гора Маат (Maat Mons) высотой 8 км

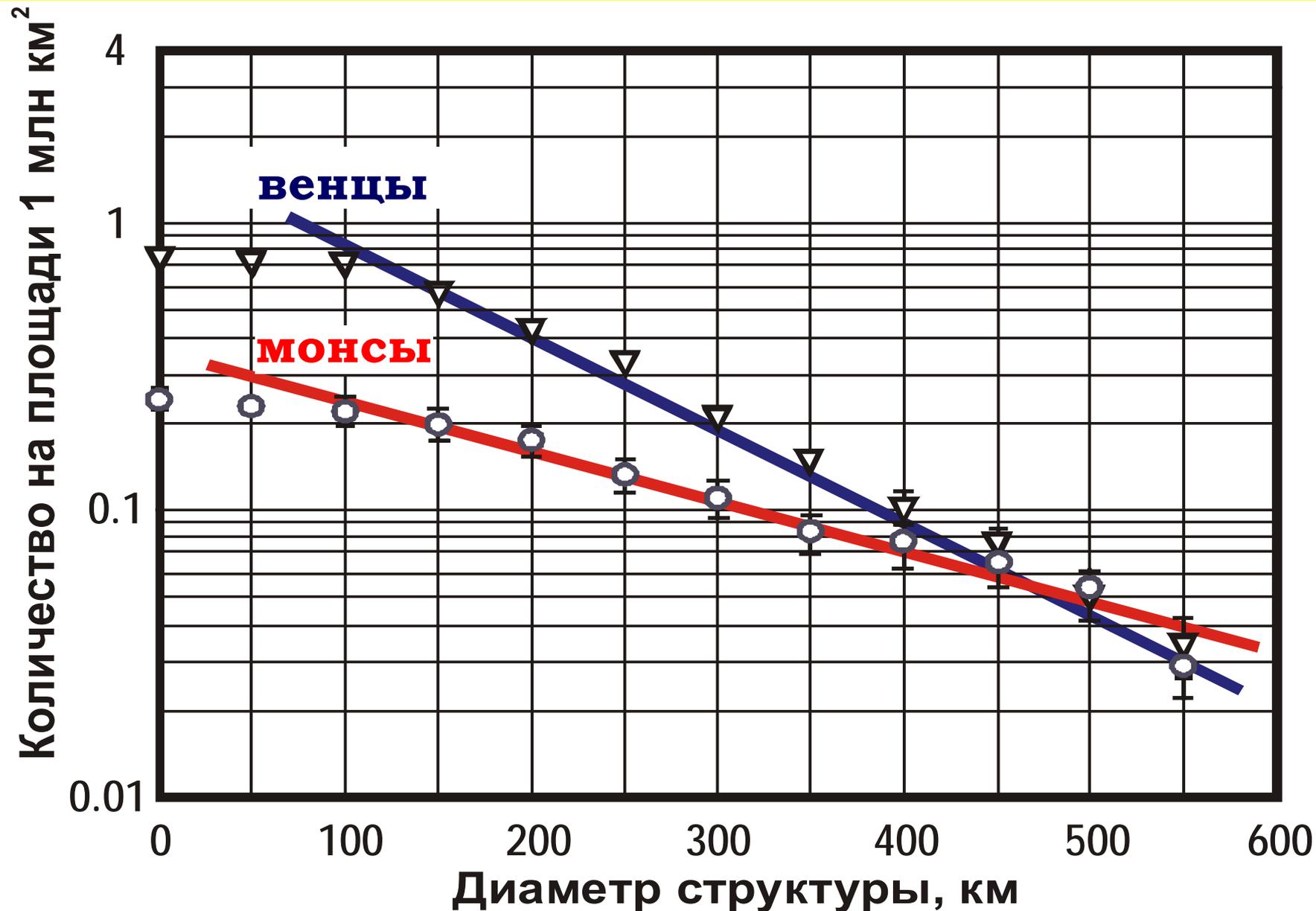
Коллективный эффект

Венцы на Венере



Цилиндрическая корона Атете диаметром в 500 км
Коллективный эффект

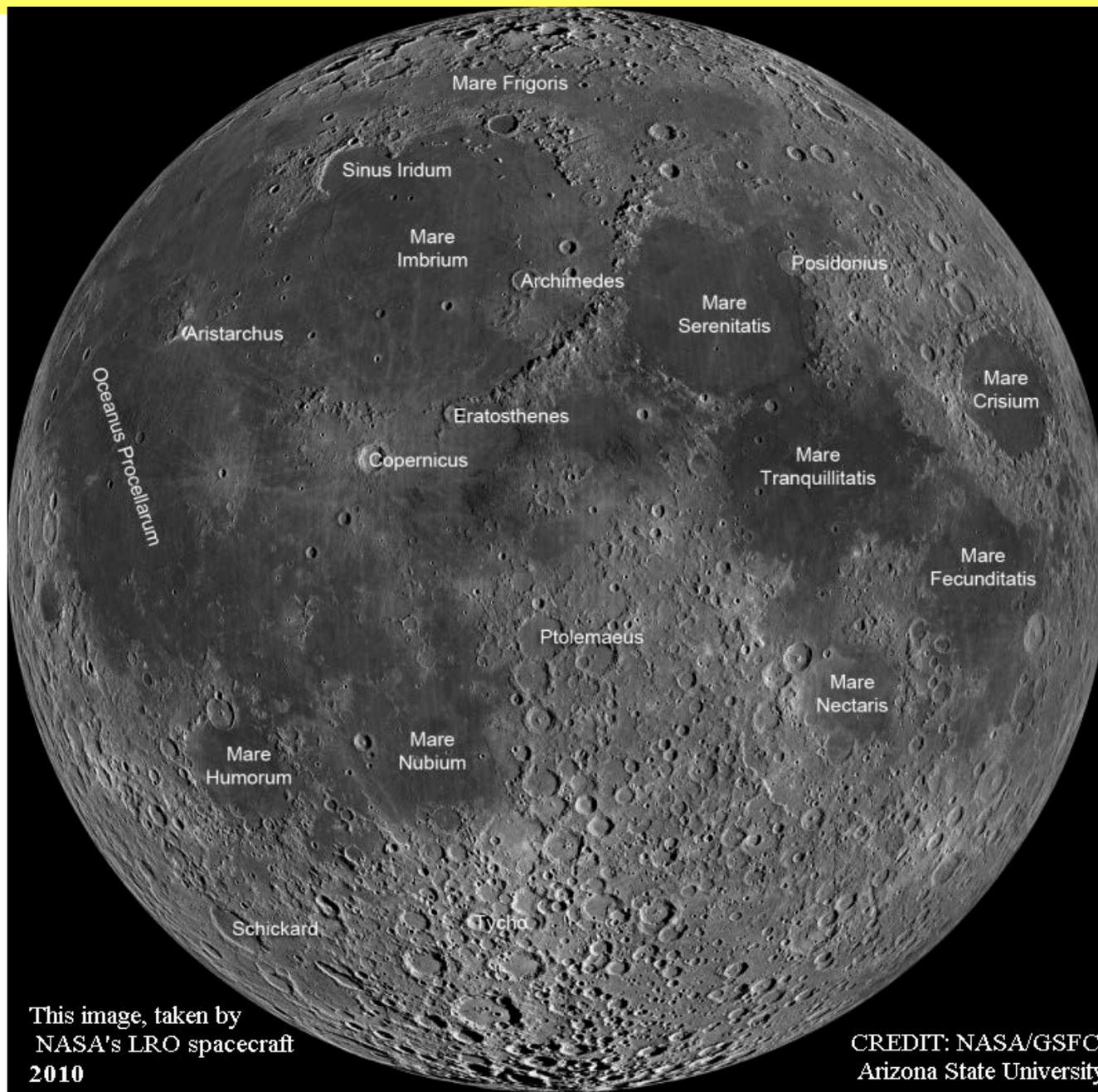
Интегральная плотность венцов и монсов на Венере



ЛУНА

Кратеры, моря, масконы

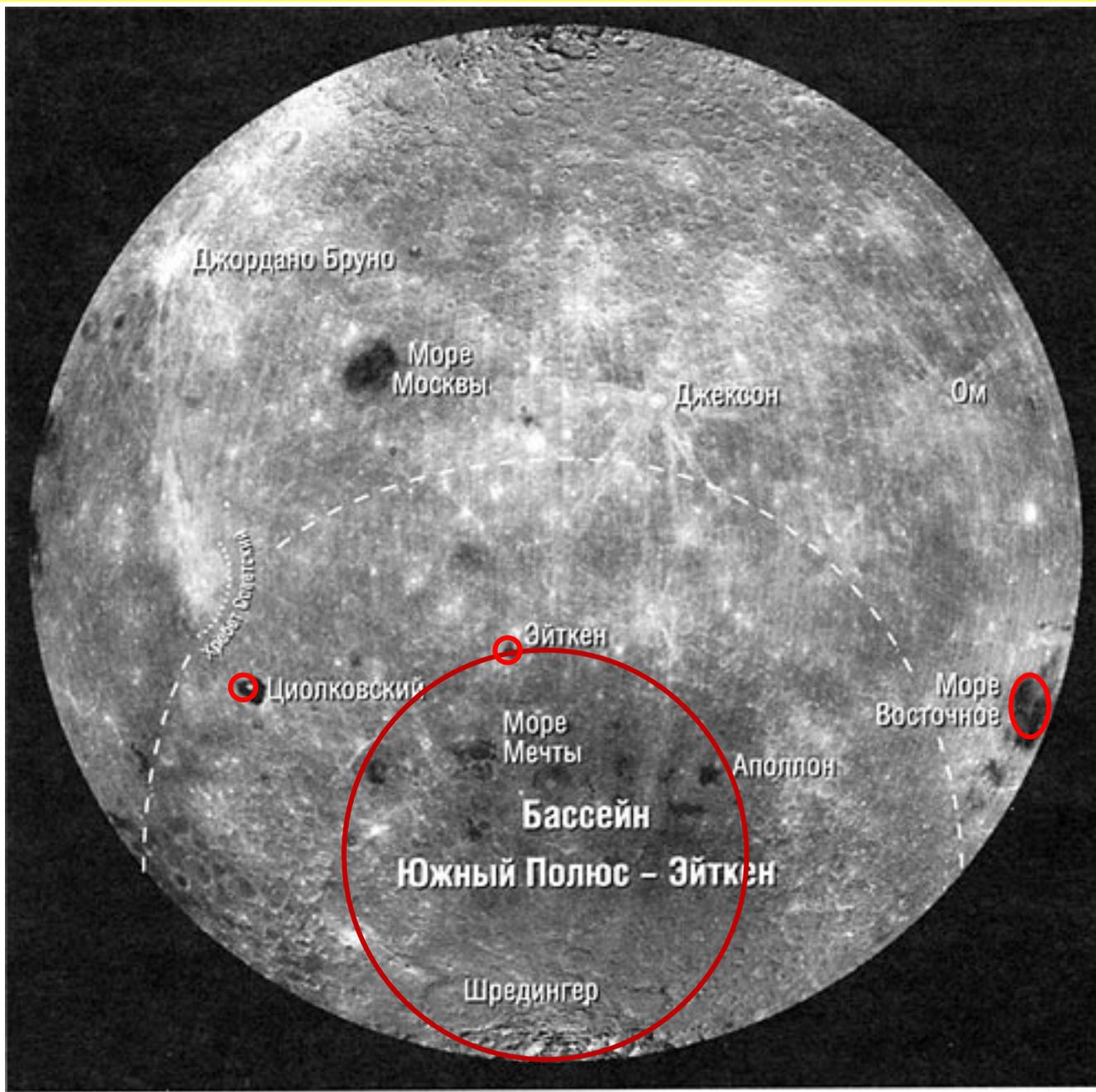
Передняя сторона Луны



This image, taken by
NASA's LRO spacecraft
2010

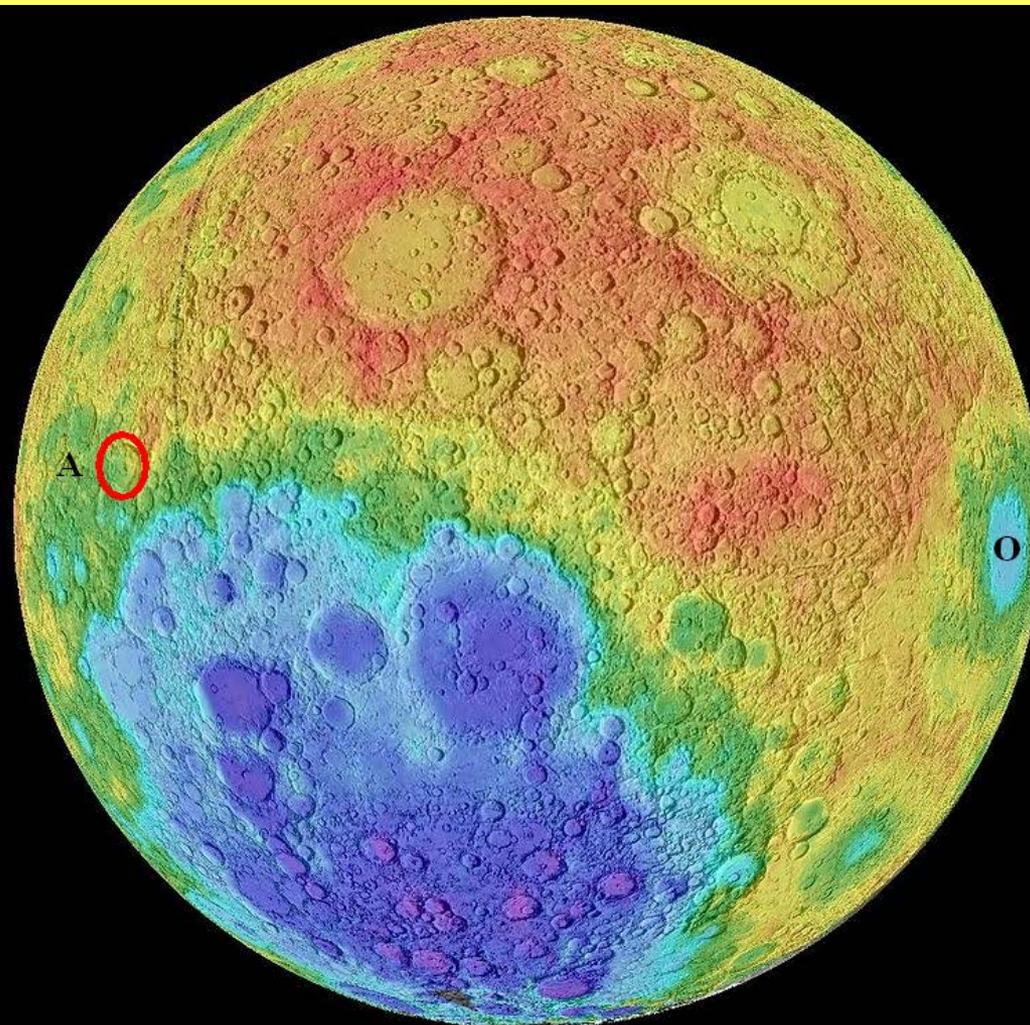
CREDIT: NASA/GSFC/
Arizona State University

Обратная сторона Луны



Бассейн «Южный полюс – Айткен» (3500 км)

Кратер Эйткен

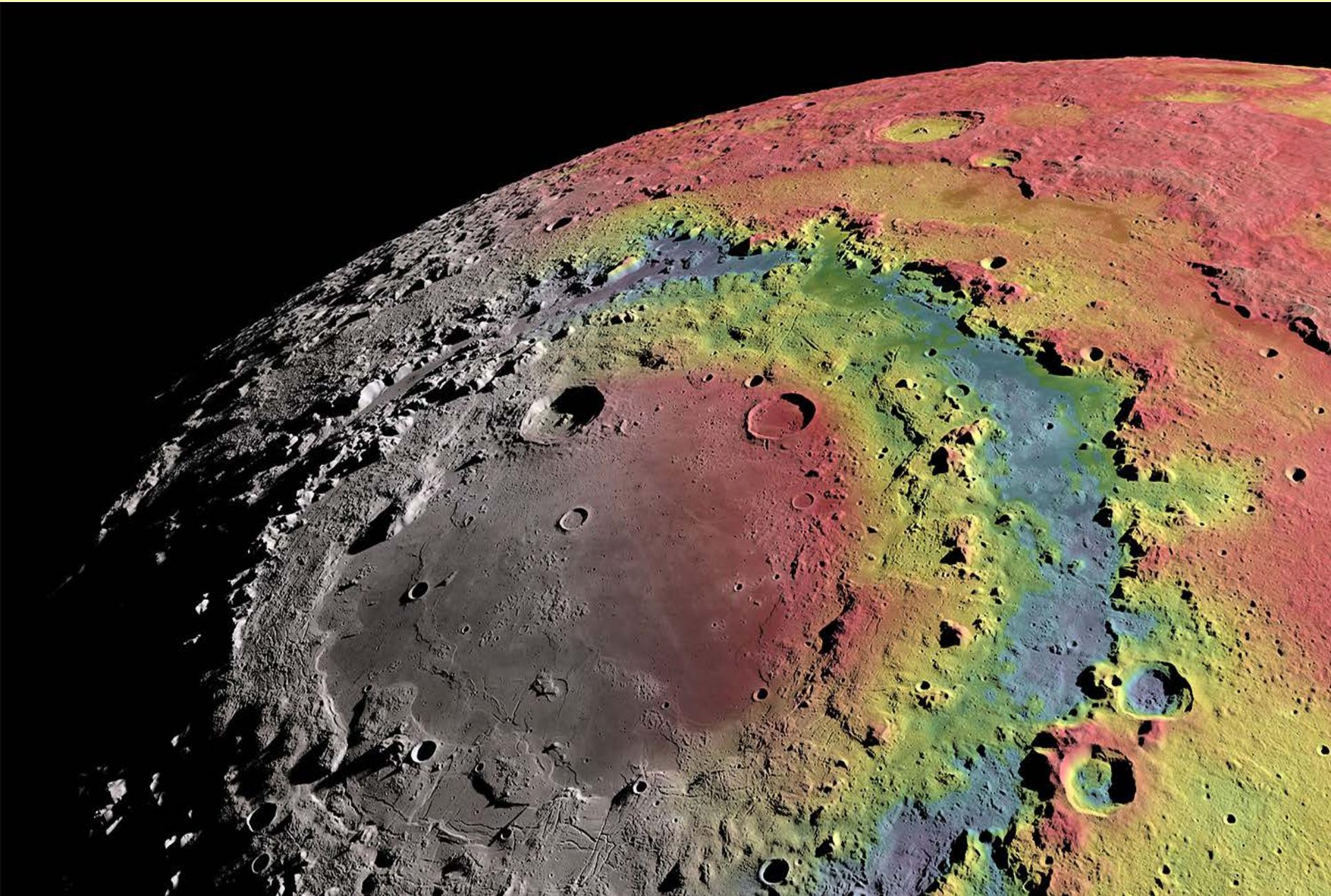


Бассейн
Море Восточное

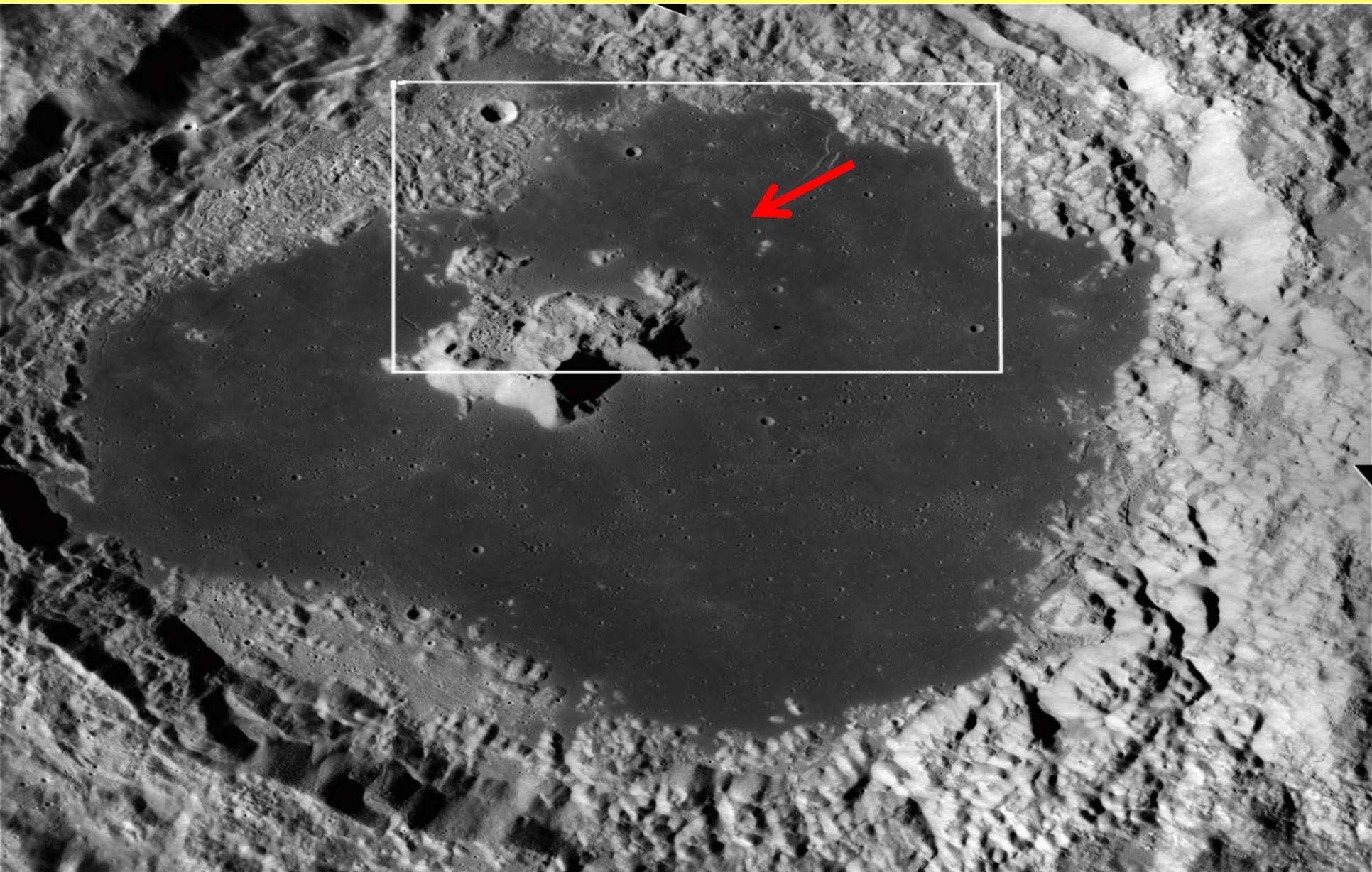
Topography (km)



Бассейн «Море Восточное» (930 км)

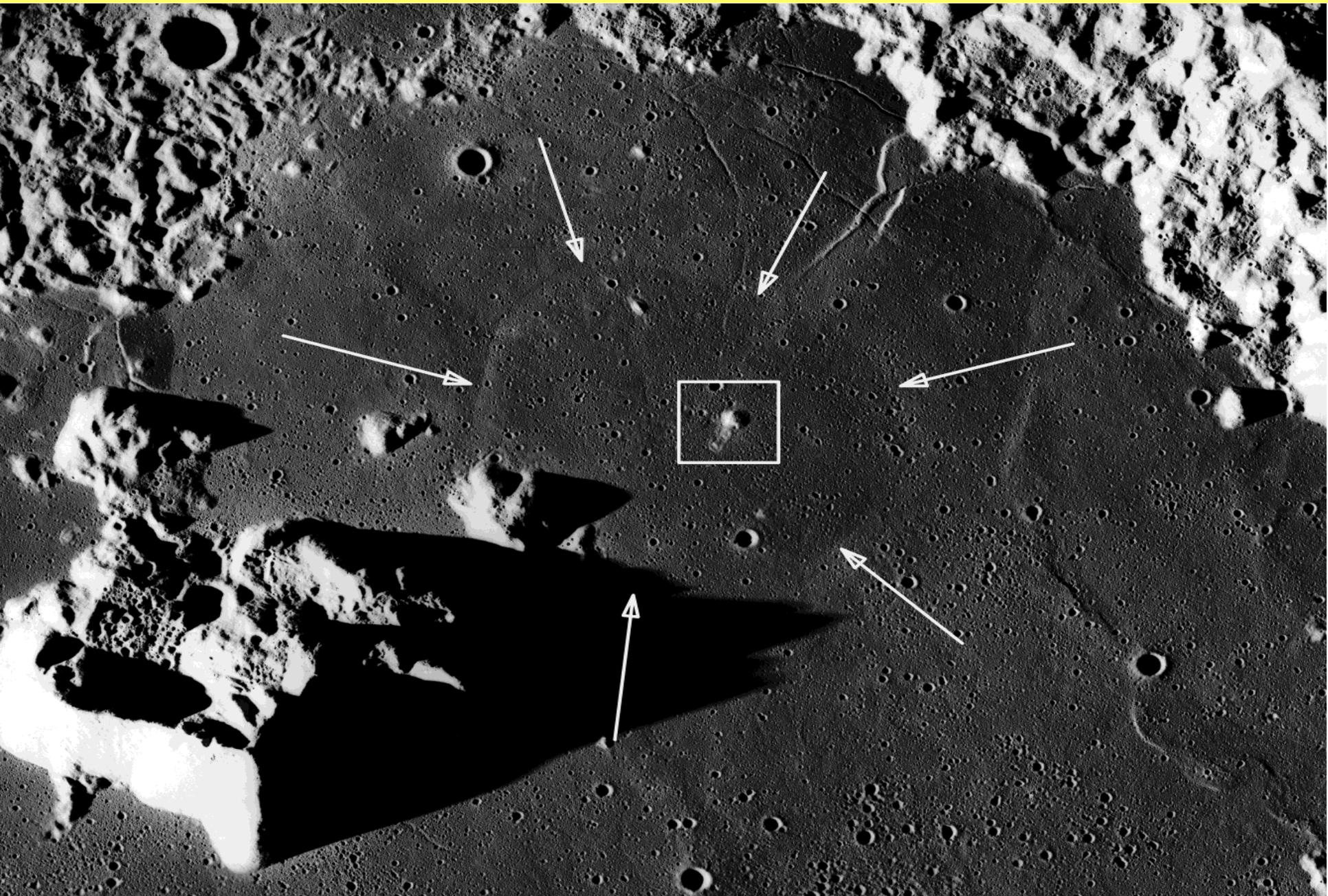


Кратер Циолковский (184 км)

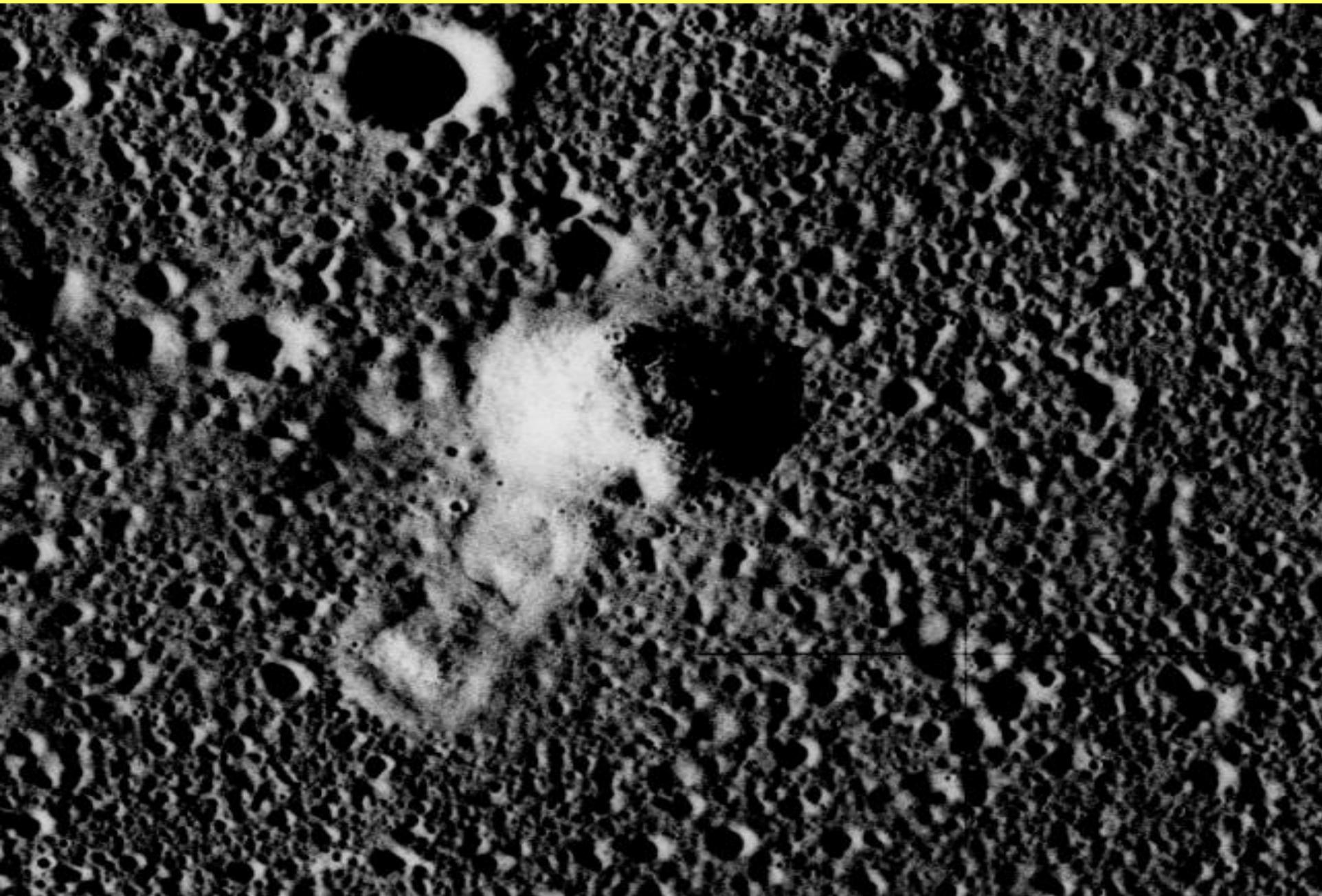


AS 17-M-2798. Credit: NASA/JSC/Arizona State University

Плоское возвышение на дне кратера Циолковский



Вулкан в кратере Циолковский

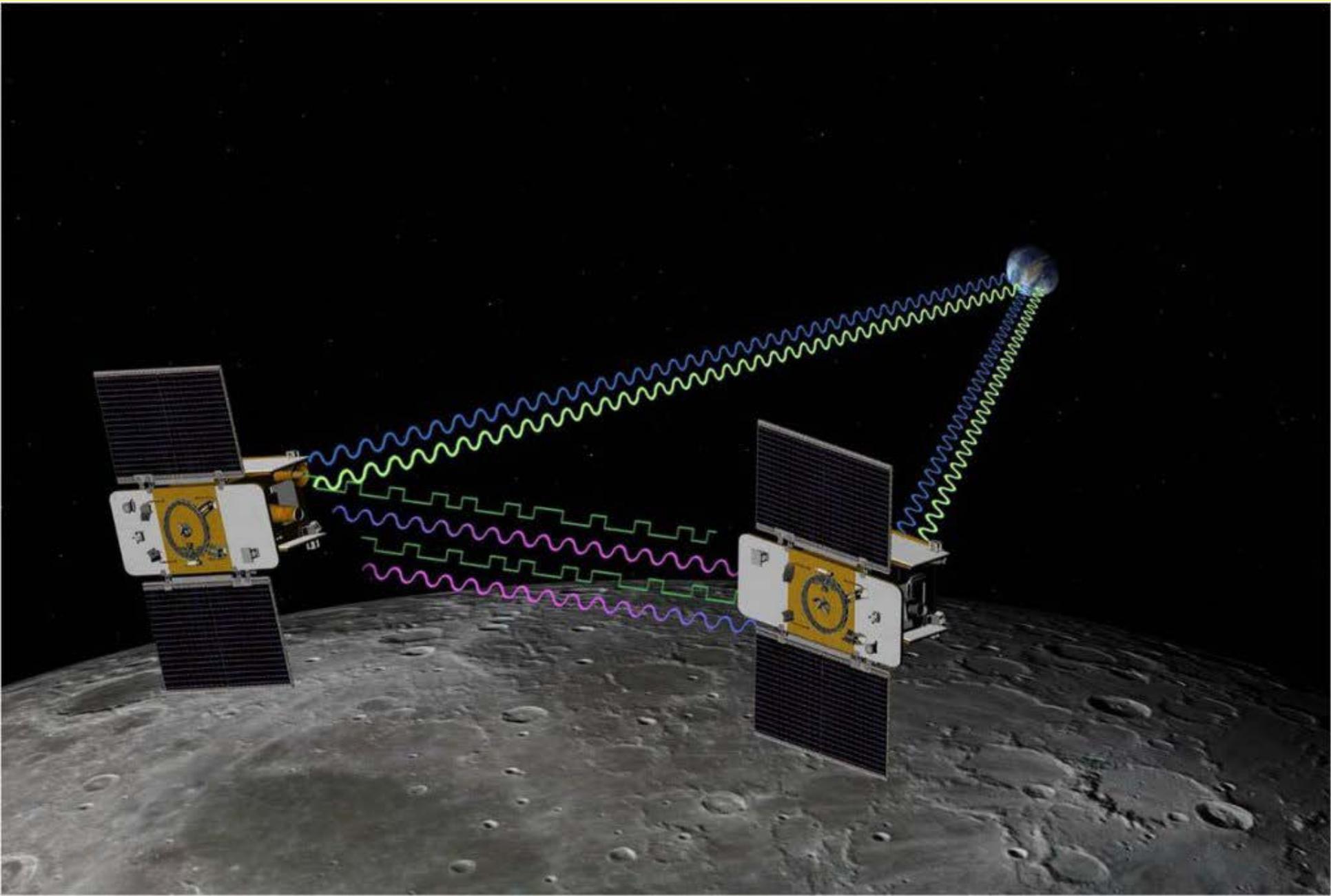


Масконы

Открытие и изучение масконов на Луне

- 1967 г. КА «Луна-10». Обнаружение локальных аномалий Буге в гравитационном поле Луны.**
- 1968 г. КА «Lunar Orbiter». Открытие масконов.**
- 1998 г. КА «Lunar Prospector». Начальный этап изучения масконов. Составление первой карты масконов.**
- 2009 г. Миссия «LRO». Детальная лазерная альтиметрия поверхности Луны высотомером «LOLA».**
- 2012 г. Миссия «GRAIL». Прецизионное изучение гравитационного поля Луны с высоты 50 км двумя КА.**
- 2015 г. Классификация масконов на основе анализа данных «GRAIL» и «LOLA»**

Изучение Луны космическими миссиями «GRAIL» и «LOLA» «



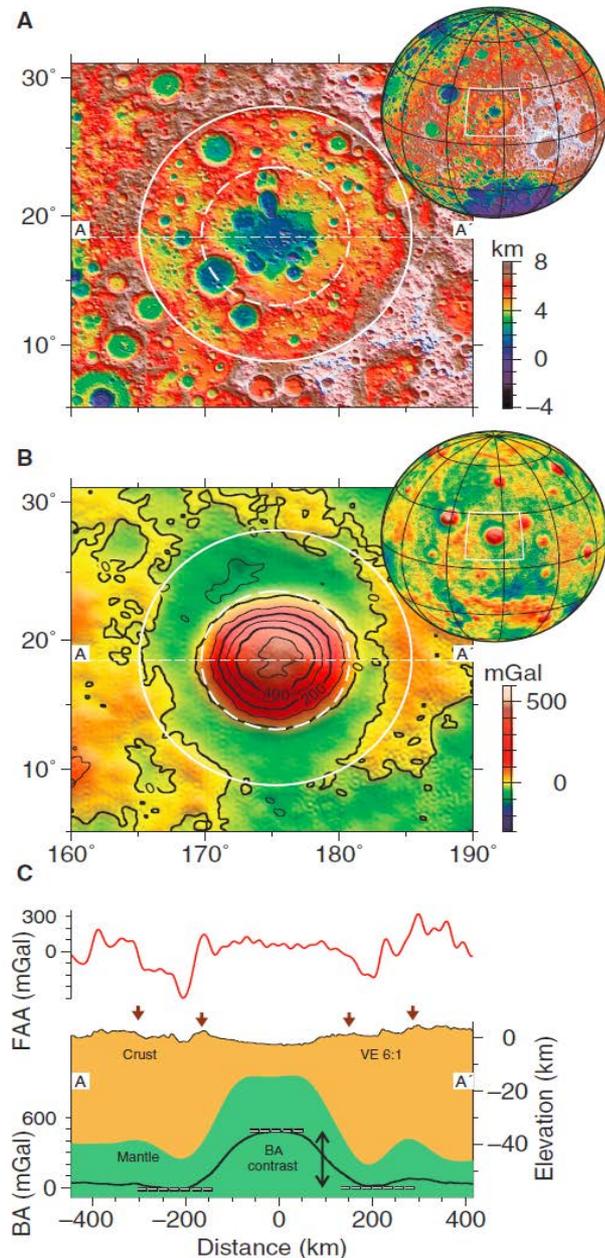
Пример морского бассейна с масконом

Бассейн Фрейндлиха-Шаронова

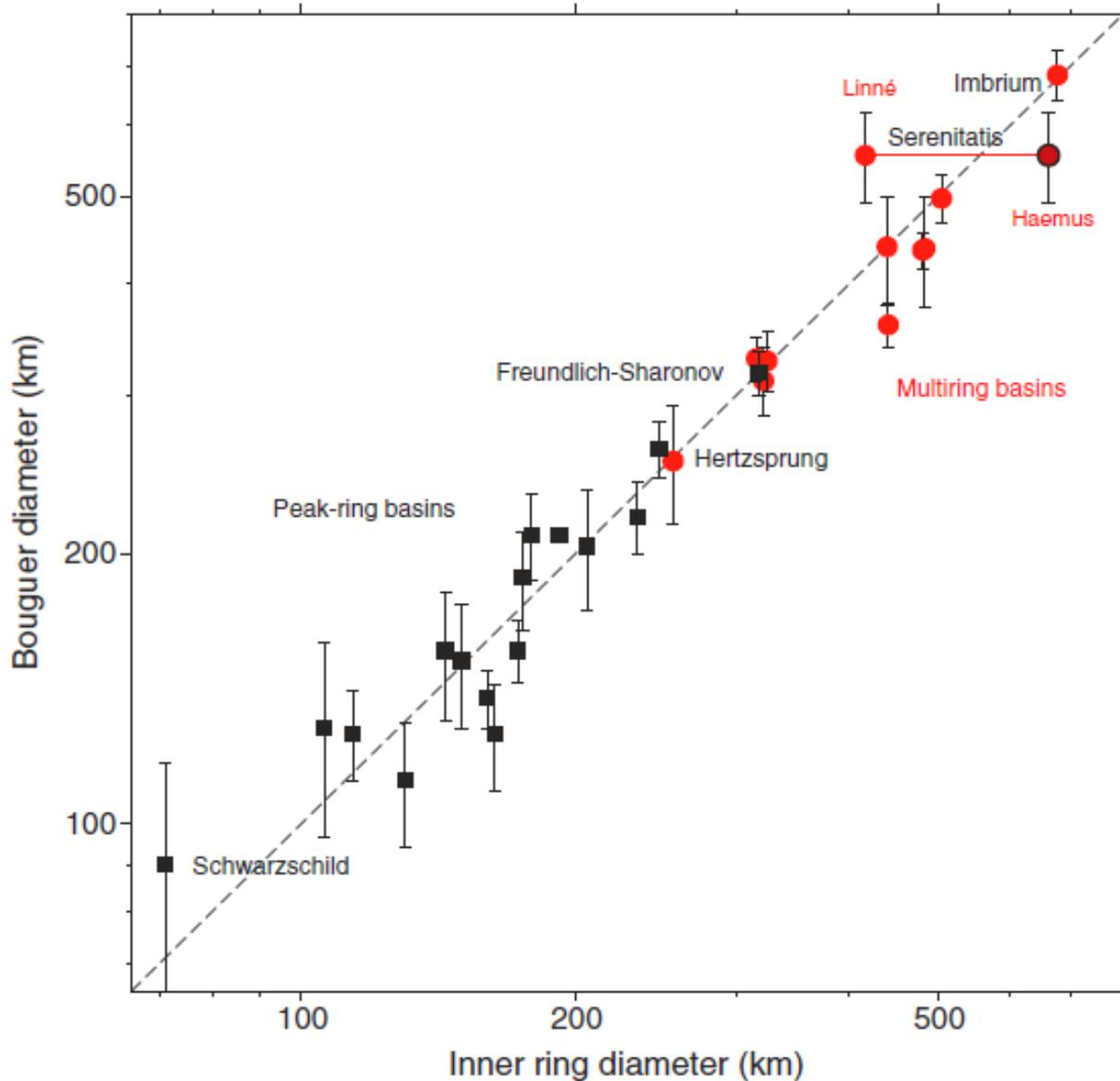
А Топография поверхности Луны в окрестности бассейна. Пунктирная и сплошная линии – обод внутреннего кольца и внешнего гребня бассейна, соответственно

В Карта гравитационной аномалии Буге над бассейном. Изолинии проведены с шагом 100 мГал. Пунктирная и сплошная линии – то же самое

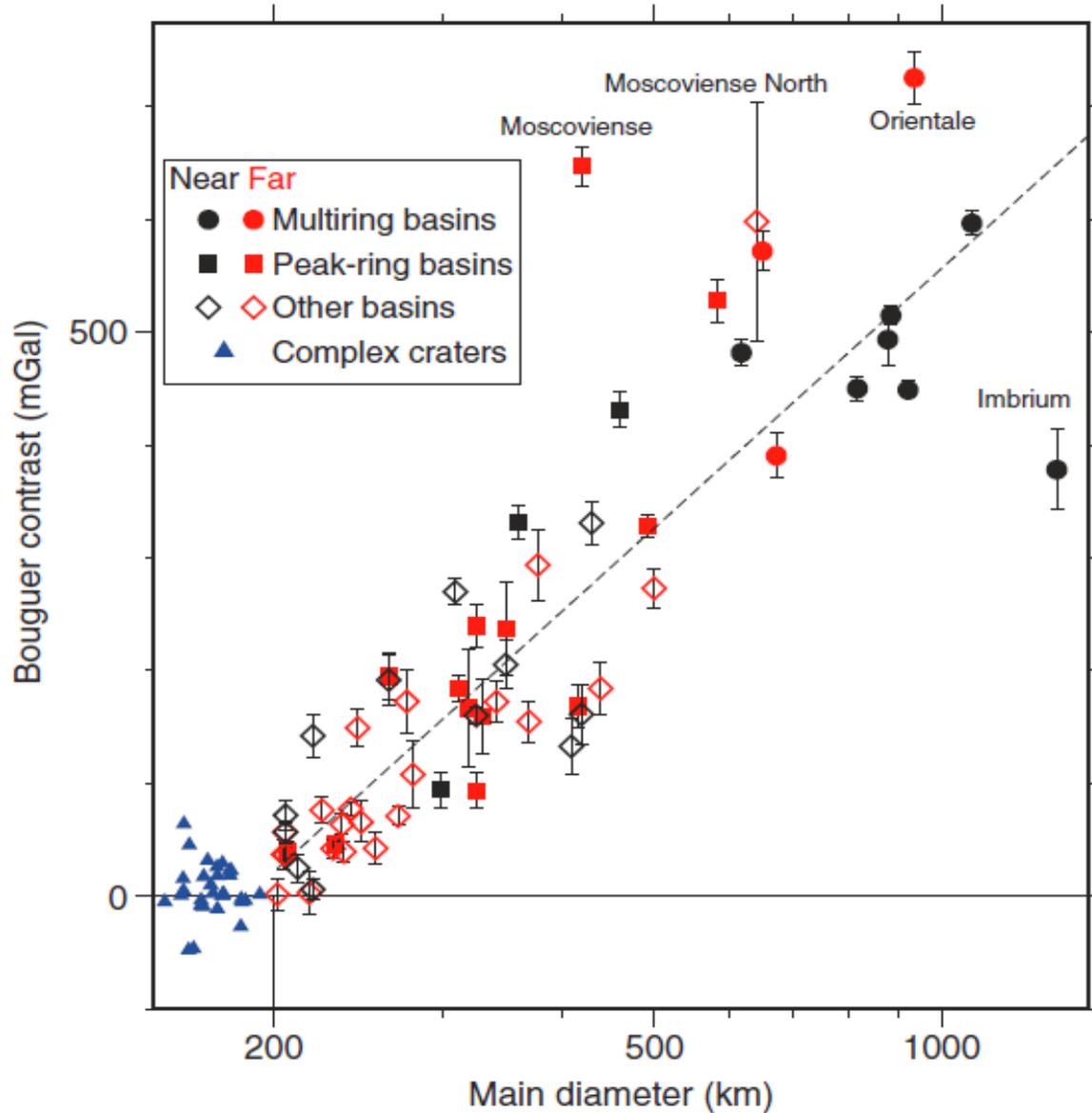
С Гравитационное поле над бассейном вдоль линии AA' (красная линия). Теоретическая модель разреза коры с мантийным диапиром. Аномалия Буге показана темной линией внизу.



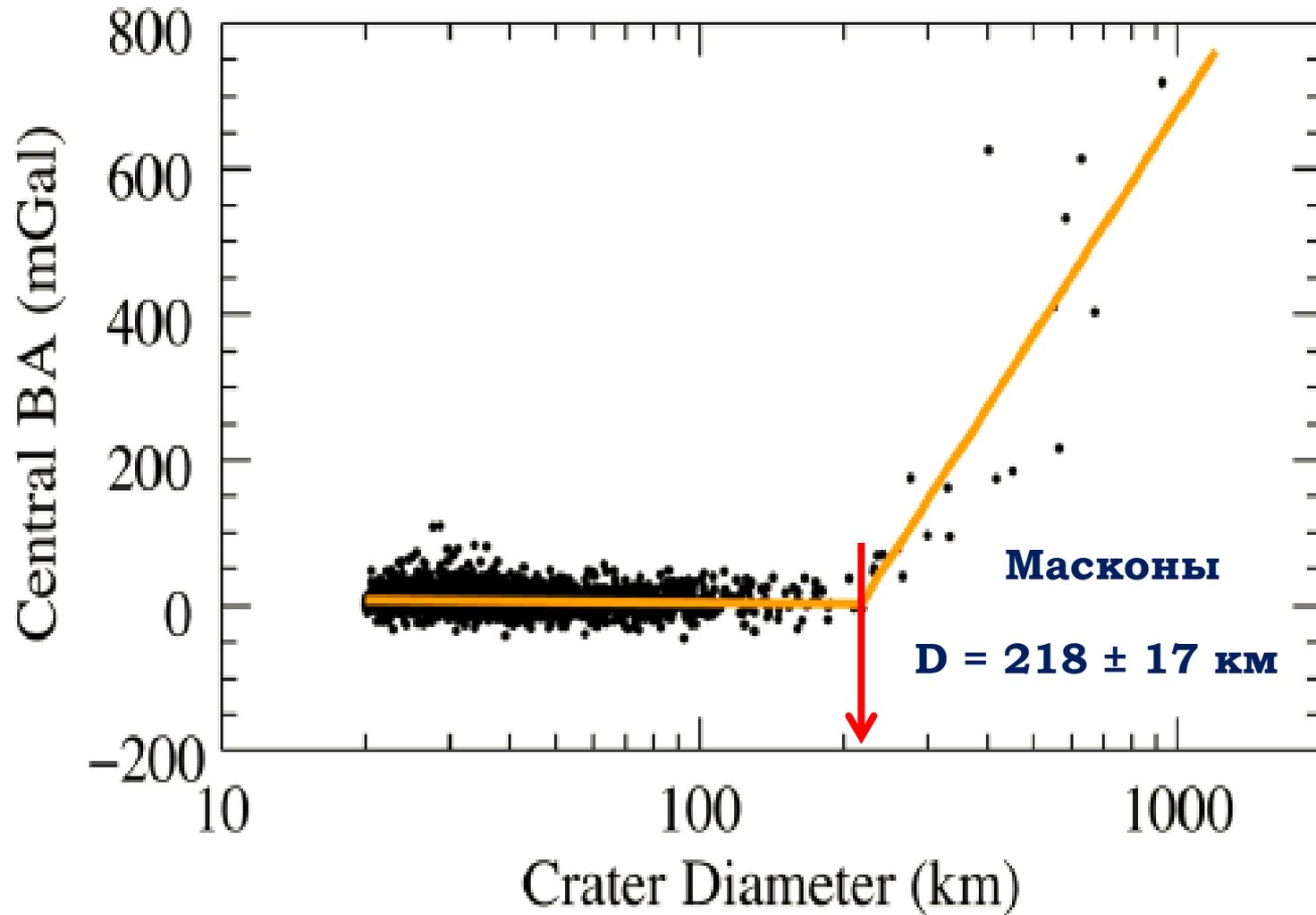
Связь диаметров аномалии Буге с диаметром бассейна



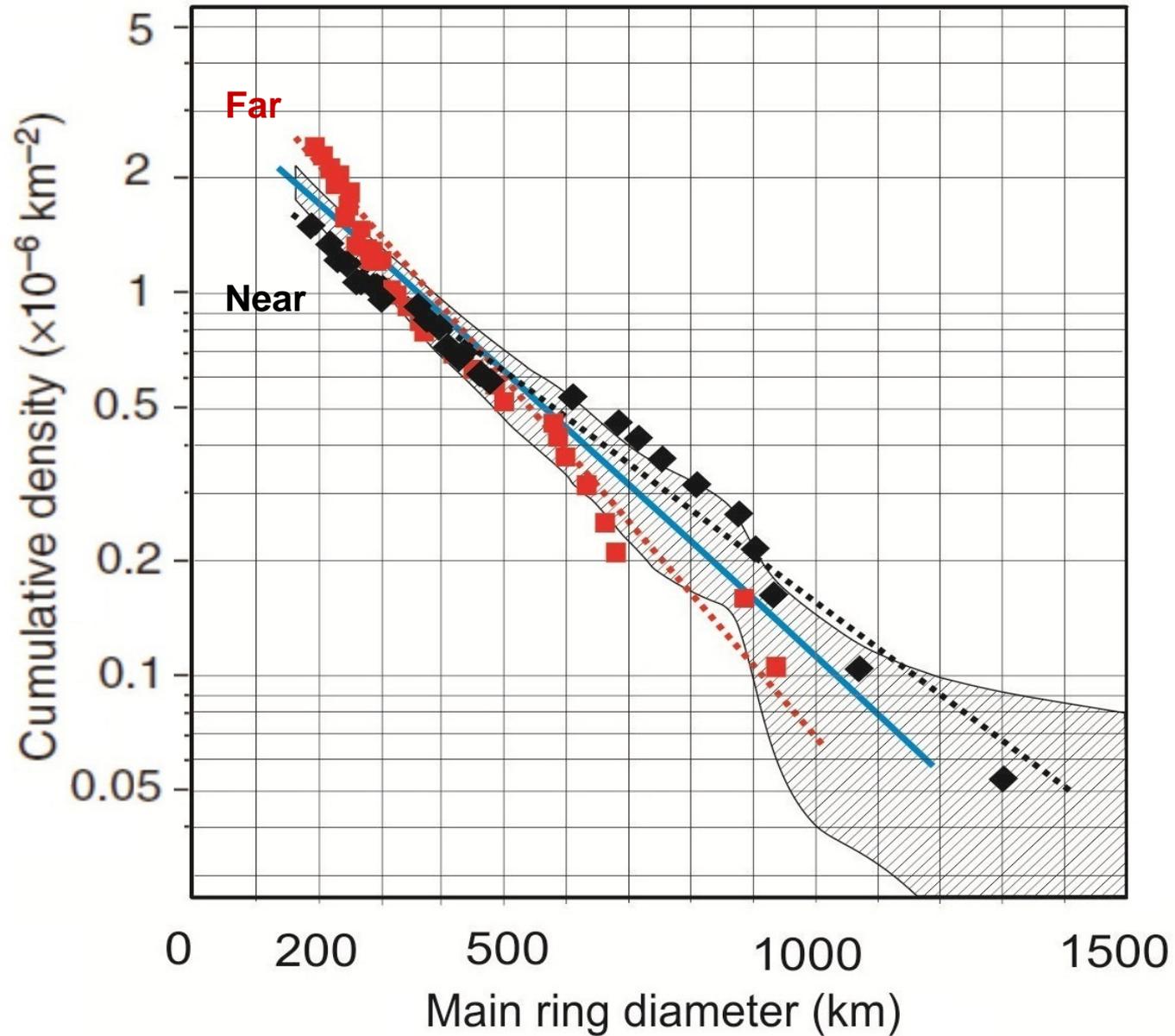
Связь амплитуды аномалии Буге с диаметром бассейна



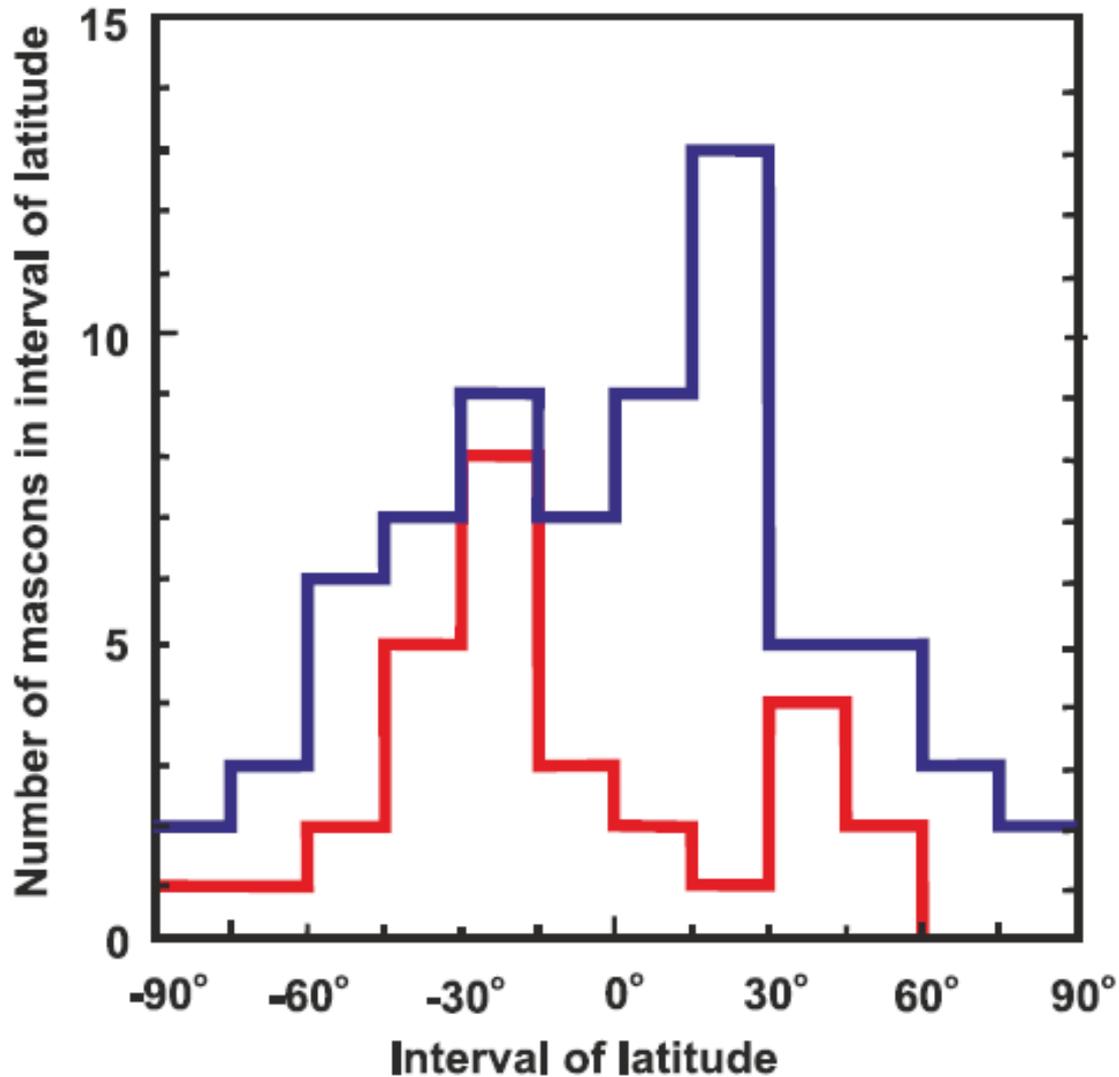
Зависимость амплитуды аномалии Буге от диаметра кратеров на континентах Луны



Распределения морей по размерам на ближней и обратной сторонах Луны



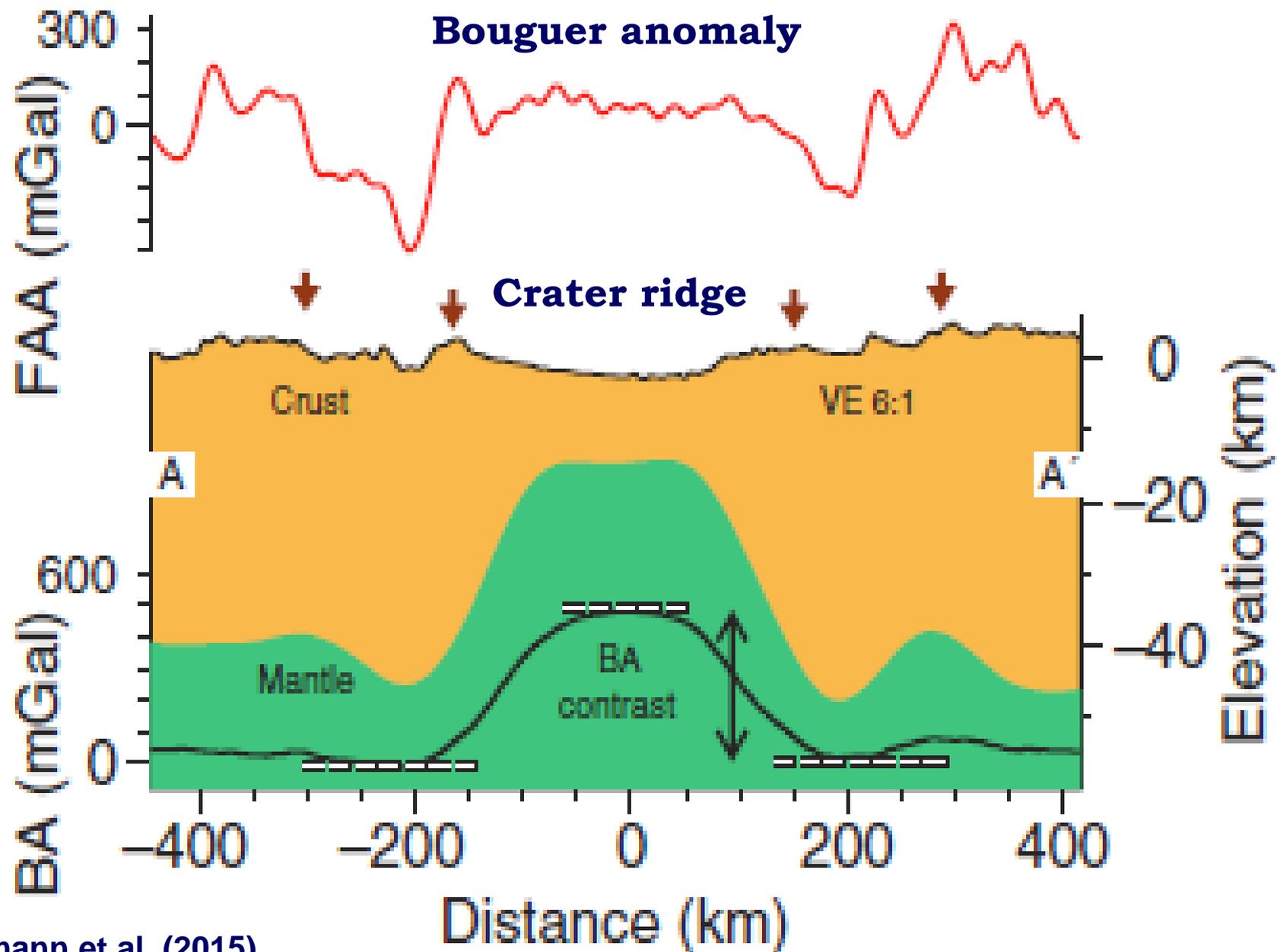
Асимметрия в расположении масконов разных возрастов в южном и северном полушариях Луны



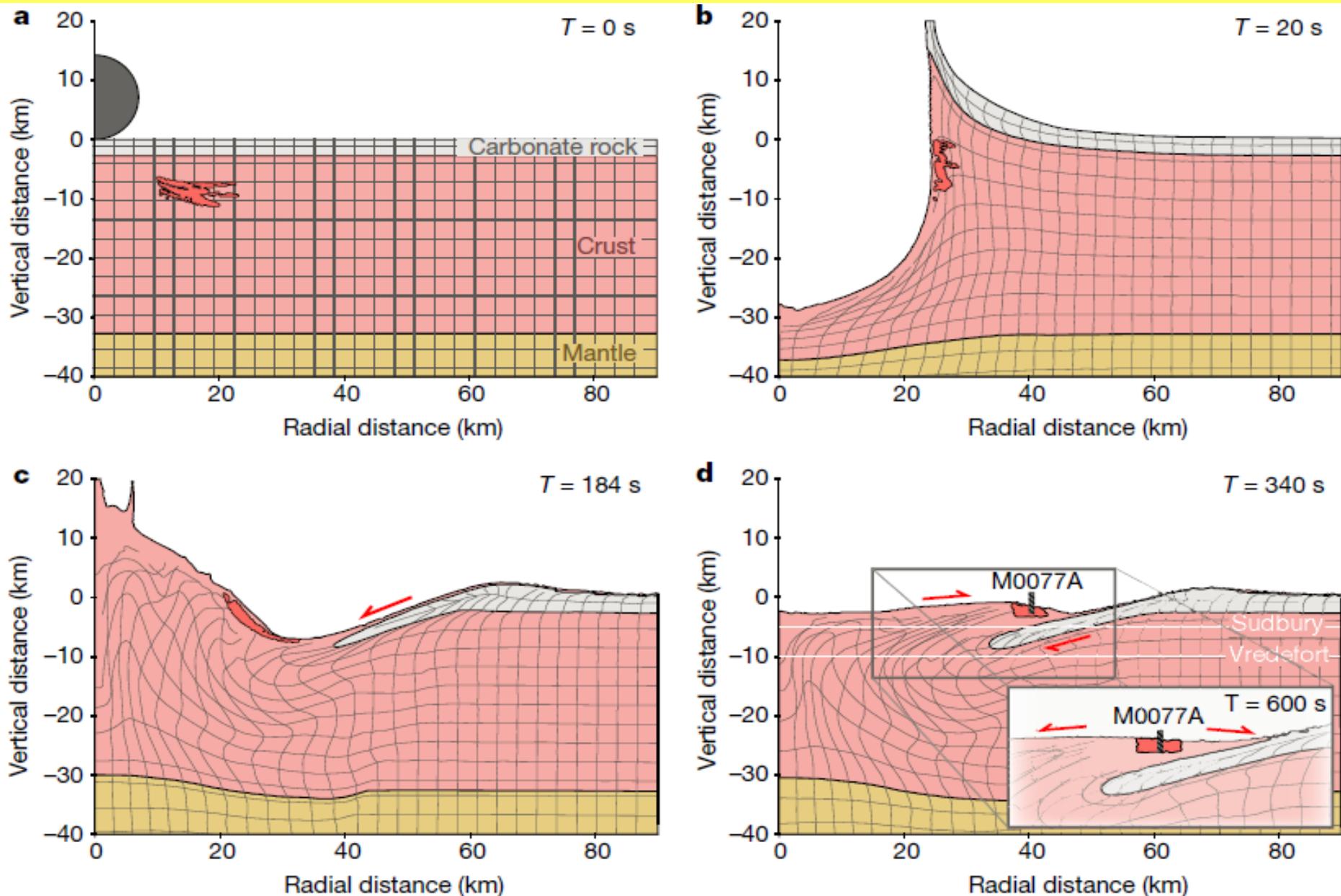
Red - "Young" mascons (basins without internal structure)
Blue - "Old" mascons (unclassified structures)

Теоретические модели образования крупных кратеров

Теоретическое объяснение строения бассейнов с масконами

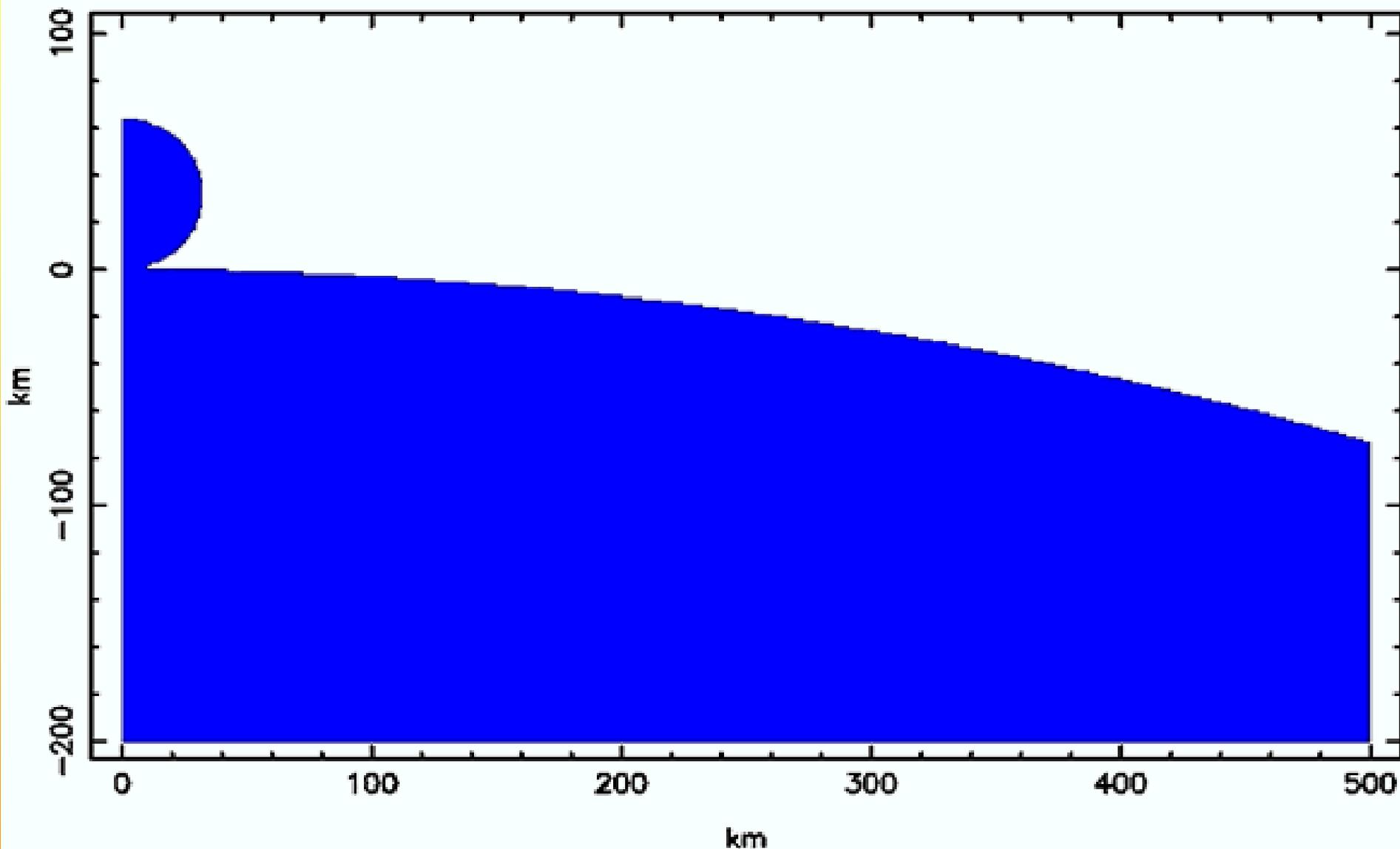


Модель образования на Земле кратера Чиксулуб (180 км)



Динамическая модель образования морских бассейнов на Луне

Plastic strain, time = 0.000 min

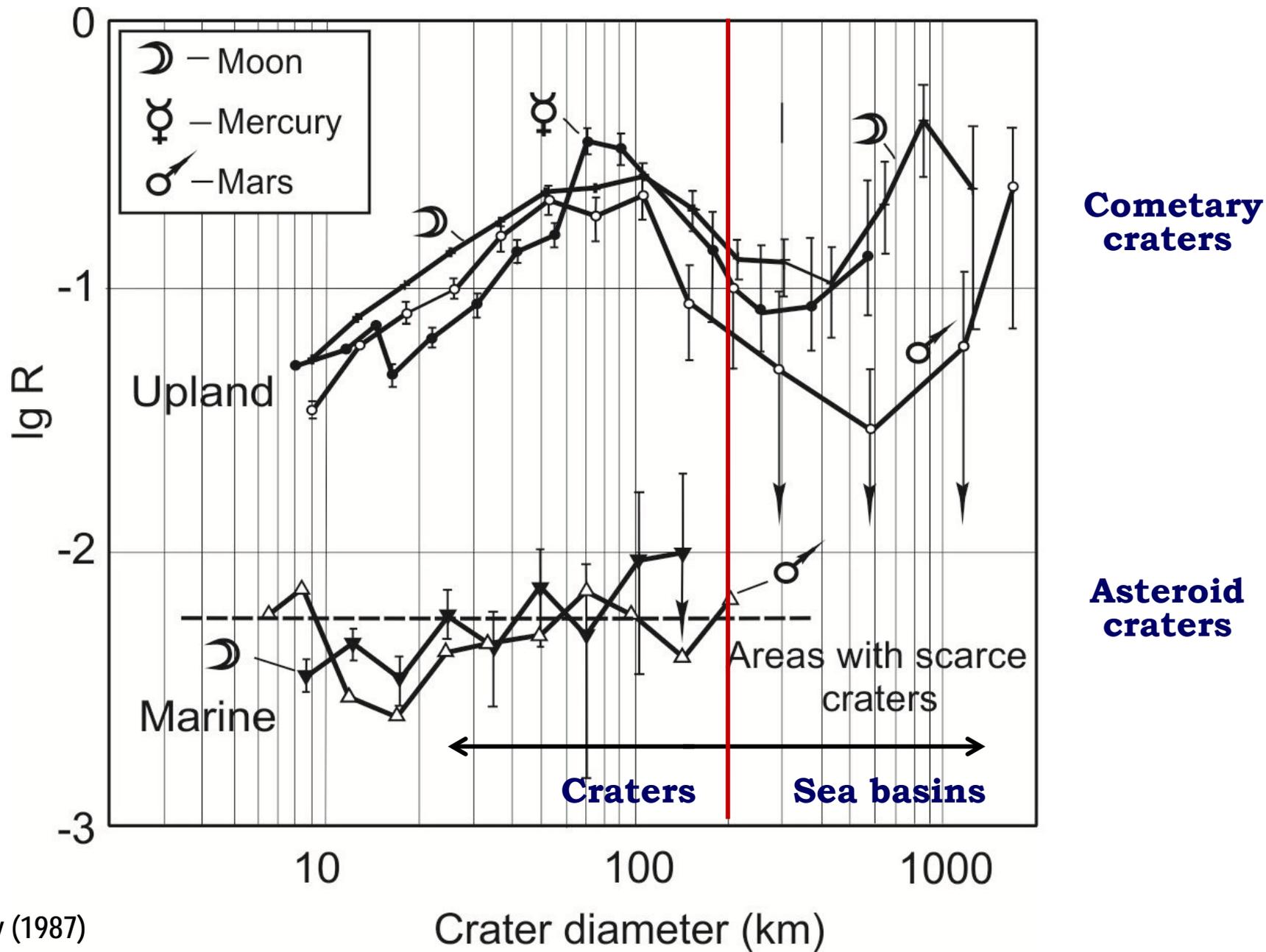


Кумулятивный механизм кратерообразования

Кумулятивный механизм кратерообразования

**Наложение кратеров, созданных
галактическими кометами**

Проблема образования морей и масконов



Эффект наложения кратеров, созданных галактическими кометами

Мы рассматриваем образование лунных кратеров, морей и масконов галактическими кометами как случайный процесс, к которому применима теория вероятностей. Образование кратеров, морей и масконов на Луне, вызванное падением галактических комет, рассматривается как случайный процесс, к которому вероятна теория теорий. В этой теории используются значения математических ожиданий M , характеризующие средние значения случайных величин.

При этом результат суммирования нескольких независимых случайных величин также является случайным с математическим ожиданием: :

$$M_{\Sigma} = \sum_1^k M_i \quad (1)$$

Пусть случайной величиной будет диаметр возникающего кратера D , а распределение самих кратеров подчиняется экспоненциальному закону: $n(D) = n_0 \exp(-\lambda D)$, где: n_0 и λ константы, а диаметр кратера $a \leq D \leq b$. Тогда процесс образования кратера можно охарактеризовать математическим ожиданием $M = \bar{D}$, где средний диаметр кратера:

$$\bar{D} = \frac{n_0 \int_a^b D e^{-\lambda D} dD}{n_0 \int_a^b e^{-\lambda D} dD} = \frac{(\alpha + \lambda^{-1})e^{-\lambda\alpha} - (b + \lambda^{-1})e^{-\lambda b}}{e^{-\lambda\alpha} - e^{-\lambda b}} \quad (2)$$

Эффект наложения кратеров от галактических комет

В частности, для $a = 0$ и $b = \infty$ величина : $M = \bar{D} = \frac{1}{\lambda}$

При наложении кратеров в результате падений нескольких комет диаметр результирующего кратера увеличивается. Распределение по размеру таких «сложных» кратеров останется экспоненциальным, а их средний диаметр составит:

$$\bar{D}_{\Sigma} = \sum_1^k \bar{D}_i = k\bar{D} = \frac{k}{\lambda} \quad (3)$$

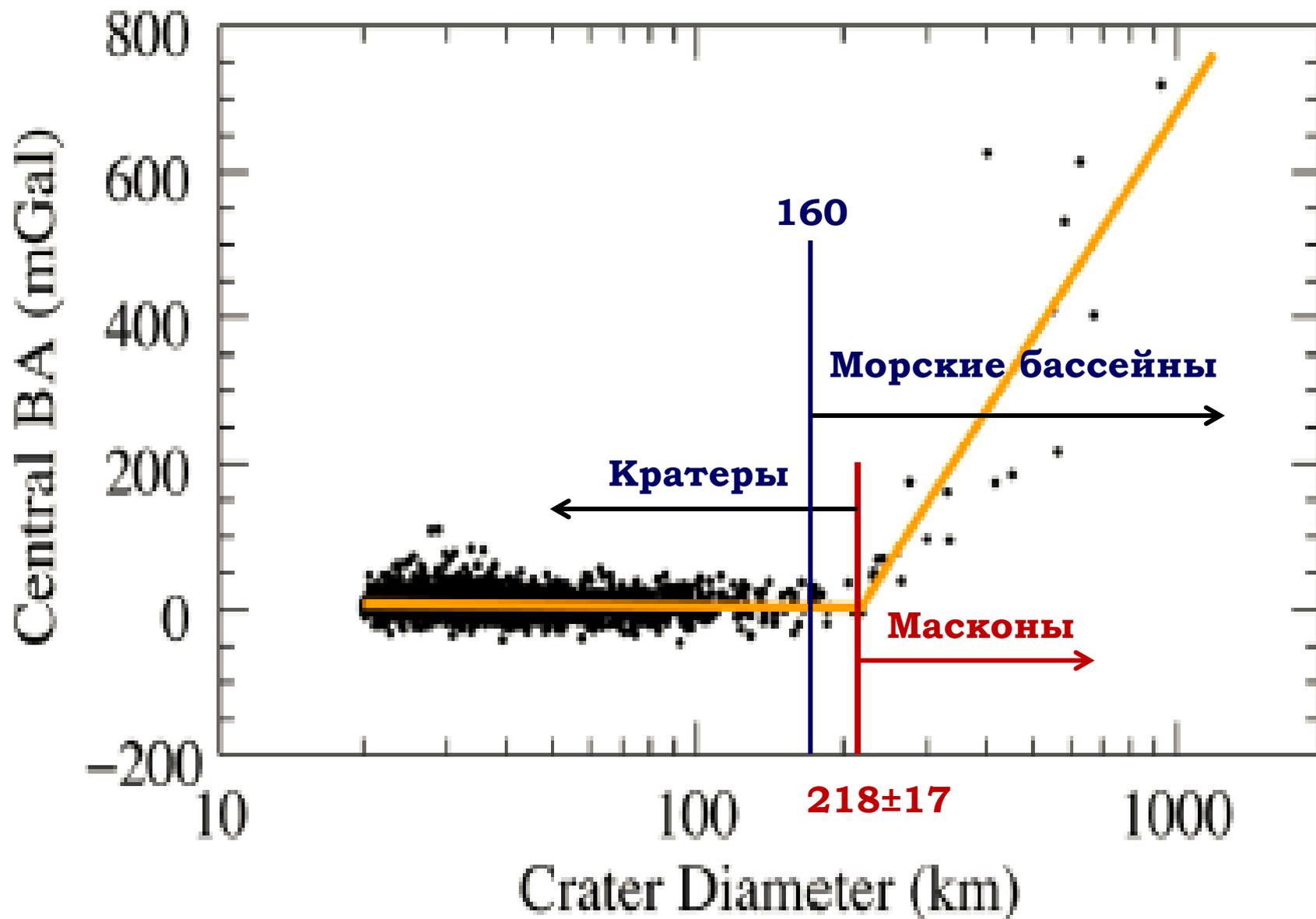
где k – число наложений.

Это рассуждение носит общий характер и поэтому применимо к процессам, которые также участвуют в формировании морских бассейнов и масконов.

Логика проста. По мере увеличения k тепловая энергия, передаваемая породам, увеличивается, в результате чего увеличивается объем магматических расплавов, образующих базальтовые моря, а также увеличивается глубина магматических камер под кратерами.

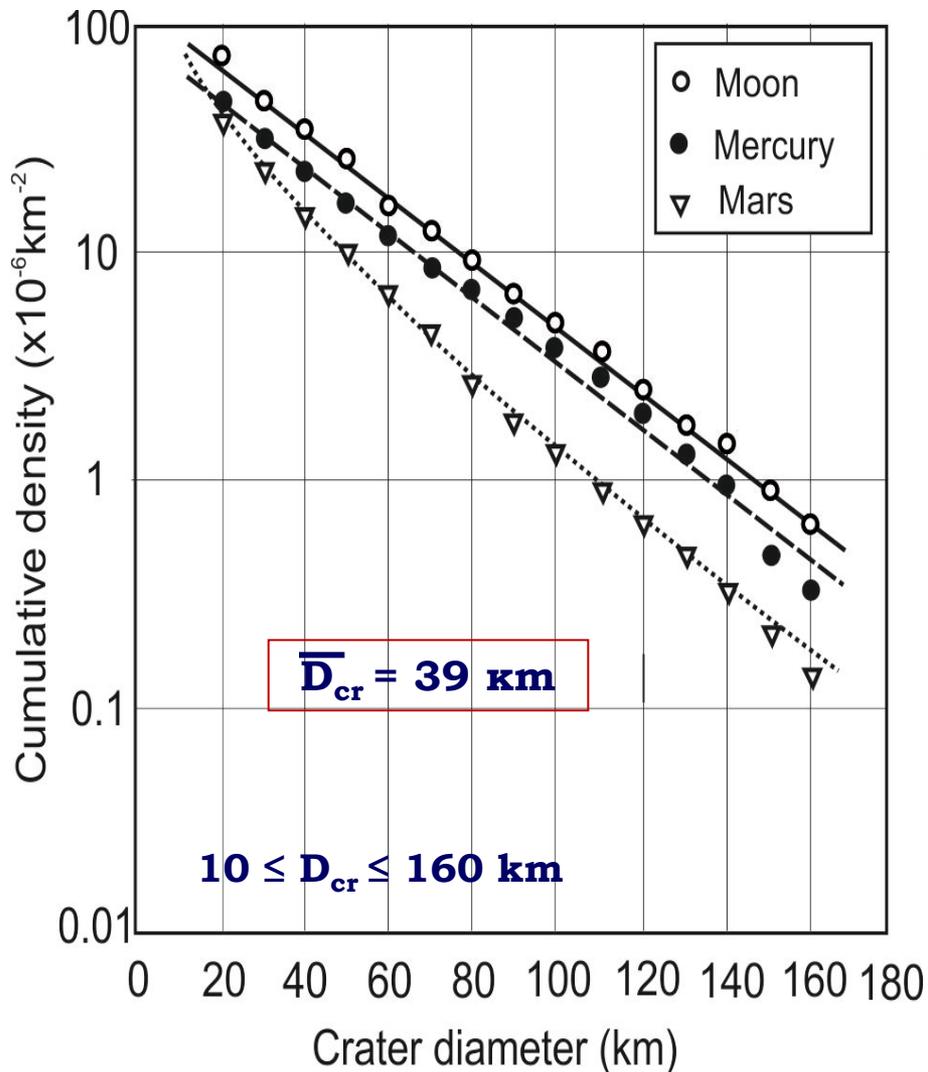
Все это приводит к естественному увеличению диаметра сложных кратеров и морских бассейнов, а также к росту амплитуд гравитационных аномалий Буге под морскими бассейнами.

Связь между аномалией Буге и диаметром кратера

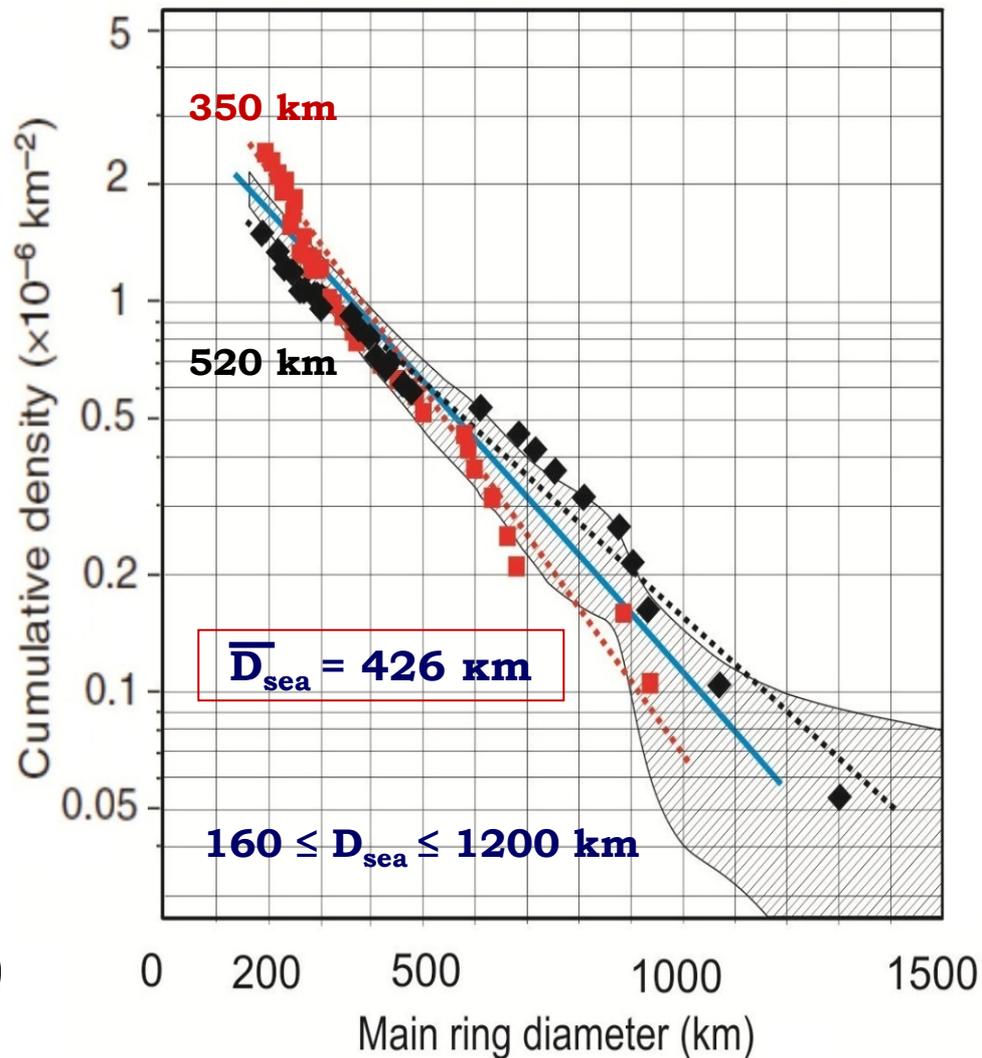


Распределение кратеров и морских бассейнов по размерам

Кратеры на континентах



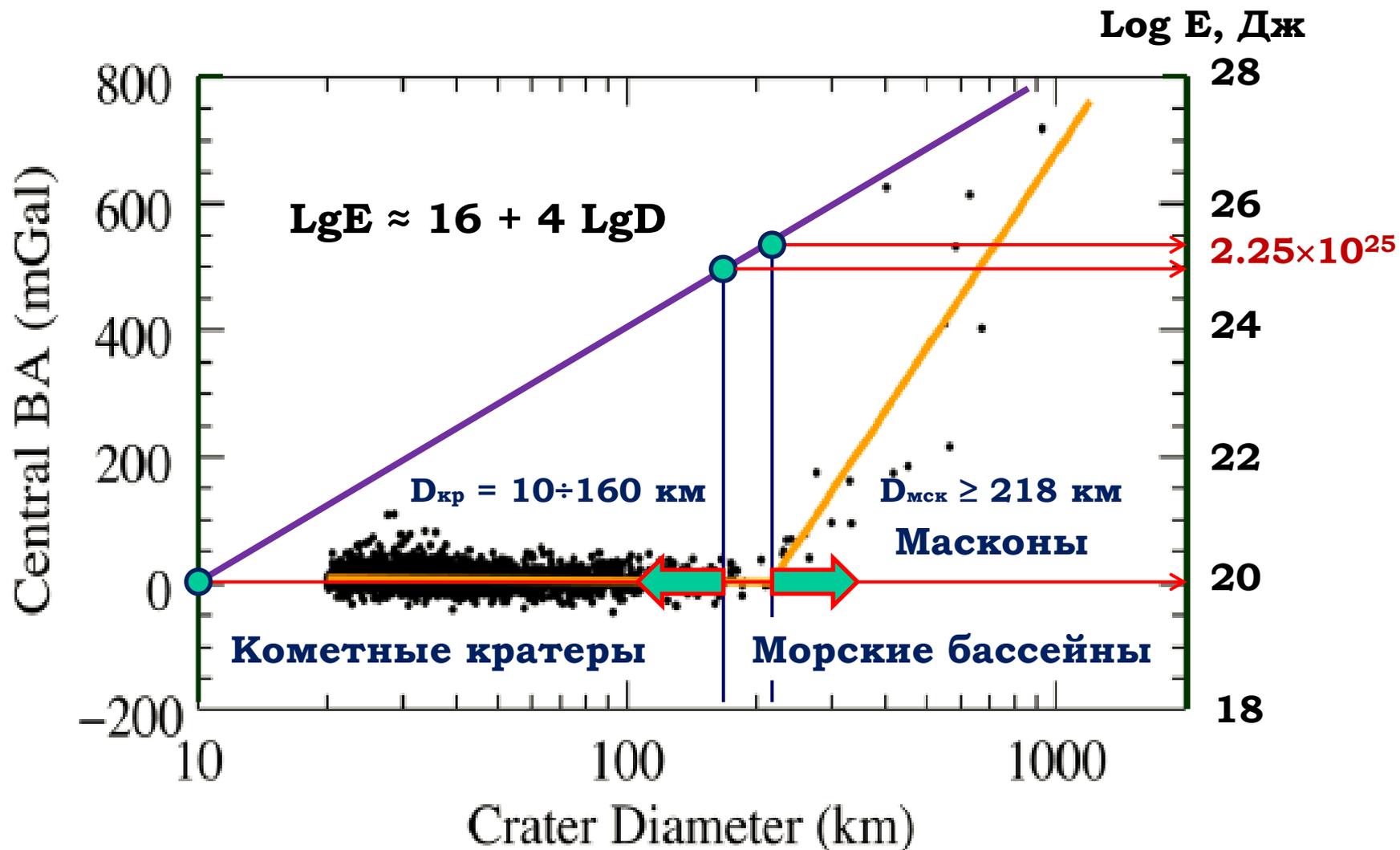
Морские бассейны



$$k = \bar{D}_{\text{sea}} / \bar{D}_{\text{cr}} = 11 \pm 2$$

Энергия образования кратеров, морей и масконов на Луне галактическими кометами

К расчету суммарной энергии галактических комет



Заключение

1. Масконы, крупные кратеры и моря на Луне, Марсе и Меркурии – это структуры, созданные бомбардировками галактических комет в периоды, когда Солнечная система находится в струйных потоках и спиральных рукавах Галактики.

2. Образование морских бассейнов и масконов требует больше энергии, чем образование кратеров. Кометные кратеры имеют диаметр $D = 10 \div 160$ км и создаются падениями одиночных комет.

3. Морские бассейны имеют $D > 160$ км, а бассейны с масконами $D > 218 \pm 17$ км. Они возникают при случайном наложении кратерных воронок, созданных несколькими крупными галактическими кометами. В случае с масконами нагрев пород распространяется и на глубины мантии.

Заключение

4. В отличие от кратеров, морские бассейны и масконы образуются с участием геодинамических (магматических) очагов, возникающих при нагревании пород кометными ударными волнами. Энергия, необходимая для создания магматических очагов ($>2.25 \times 10^{25}$ Дж), может быть обеспечена только большим количеством галактических комет, что возможно только в условиях высокой плотности их падений.

5. Морские бассейны и большинство континентальных кратеров на Луне возникли в кайнозое под влиянием 2-3 бомбардировок галактическими кометами. Масконы на континентах старше, но их возраст едва превышает мезозой (последние 180 млн лет).

Спасибо за внимание!