

Баренбаум А.А. (ИПНГ РАН)

**ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ
КОМЕТ С ПЛАНЕТАМИ НА ОСНОВЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ**

М.А. ЛАВРЕНТЬЕВА

**Забабахинские научные чтения – 2017
Снежинск – 20-24.03.2017**

Баренбаум А.А. (ИПНГ РАН)

**ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ
КОМЕТ С ПЛАНЕТАМИ НА ОСНОВЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ**

М.А. ЛАВРЕНТЬЕВА

План сообщения

- 1.Идеализированные модели М.А. Лаврентьева**
- 2.Галактические кометы. Что сегодня о них известно**
- 3.Механизм взаимодействия комет с планетами**
- 4.Направления дальнейших исследований**

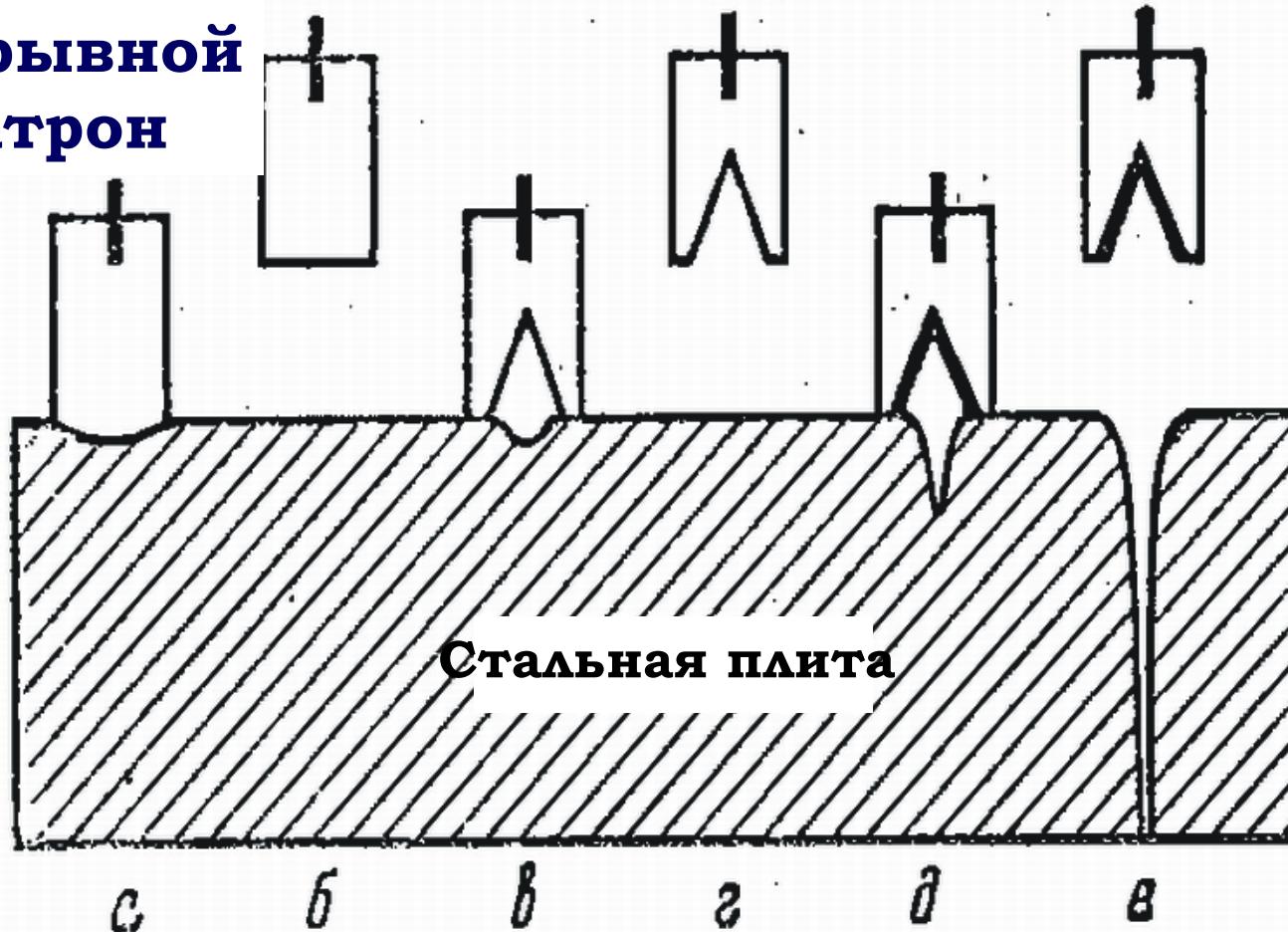
**Забабахинские научные чтения – 2017
Снежинск – 20-24.03.2017**

**Гидродинамическая теория
М.А. Лаврентьева идеальной
несжимаемой жидкости
первого приближения**

Модель «УПРУГОГО» взаимодействия

Эксперименты М.А. Лаврентьева (1957)

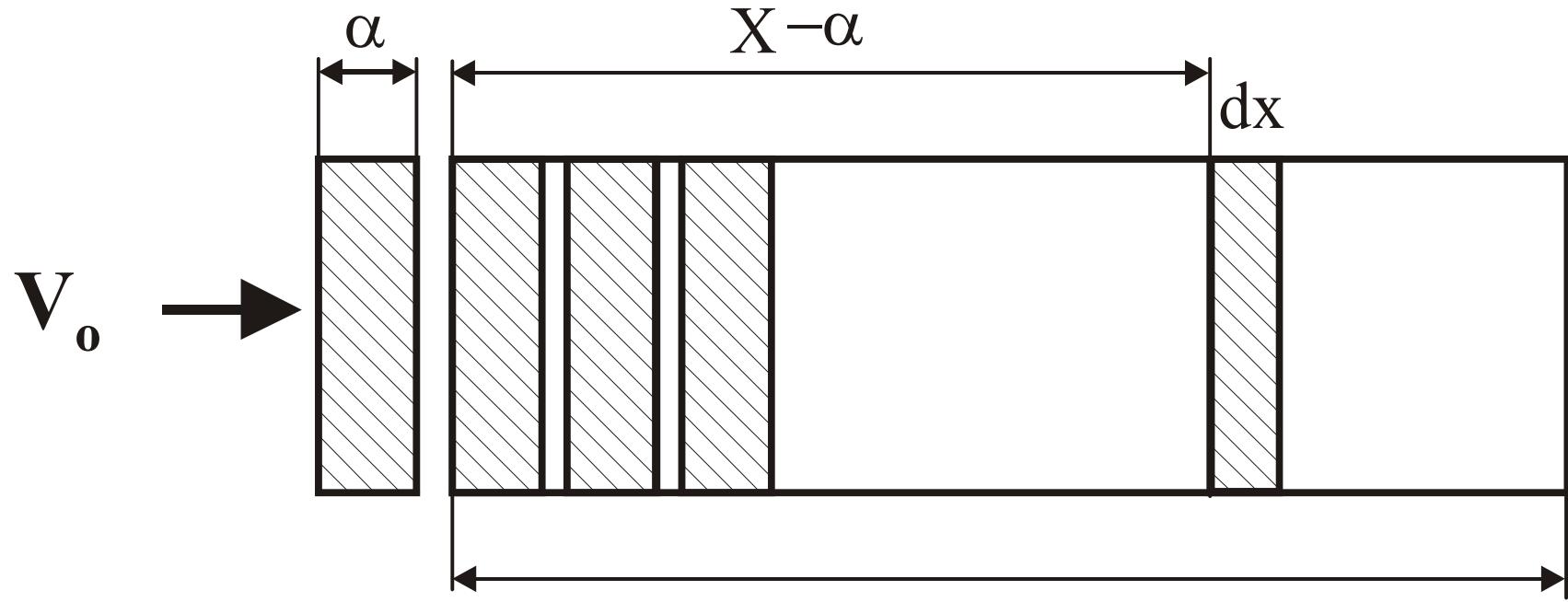
подрывной
патрон



Кумулятивный эффект

Модель «НЕУПРУГОГО» взаимодействия

Формулировка задачи М.А. Лаврентьевым (1959)



Тонкие пластины
из несжимаемого
материала

L

Механизм нагрева ударной волной

Цель презентации

**Обосновать применимость
теоретических моделей Лаврентьева
для галактических комет**

**Показать, что галактические кометы
взаимодействуют с планетами по
обоим механизмам**

Галактические кометы

Их происхождение и свойства

Галактические кометы

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

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

Параметры ядер ГК:

$d = 100 - 3500$ м;

$\rho = 1$ г/см³;

$m = 10^{12} - 10^{17}$ г

$V = 450$ км/с

$E = 10^{20} - 10^{25}$ Дж

Падения ГК носят характер «кометных ливней»

$\Delta t = 1 - 5$ млн. лет

$T = 20 - 37$ млн. лет

$N = 10^5 - 10^7$ комет

За 1 бомбардировку на Землю поступает

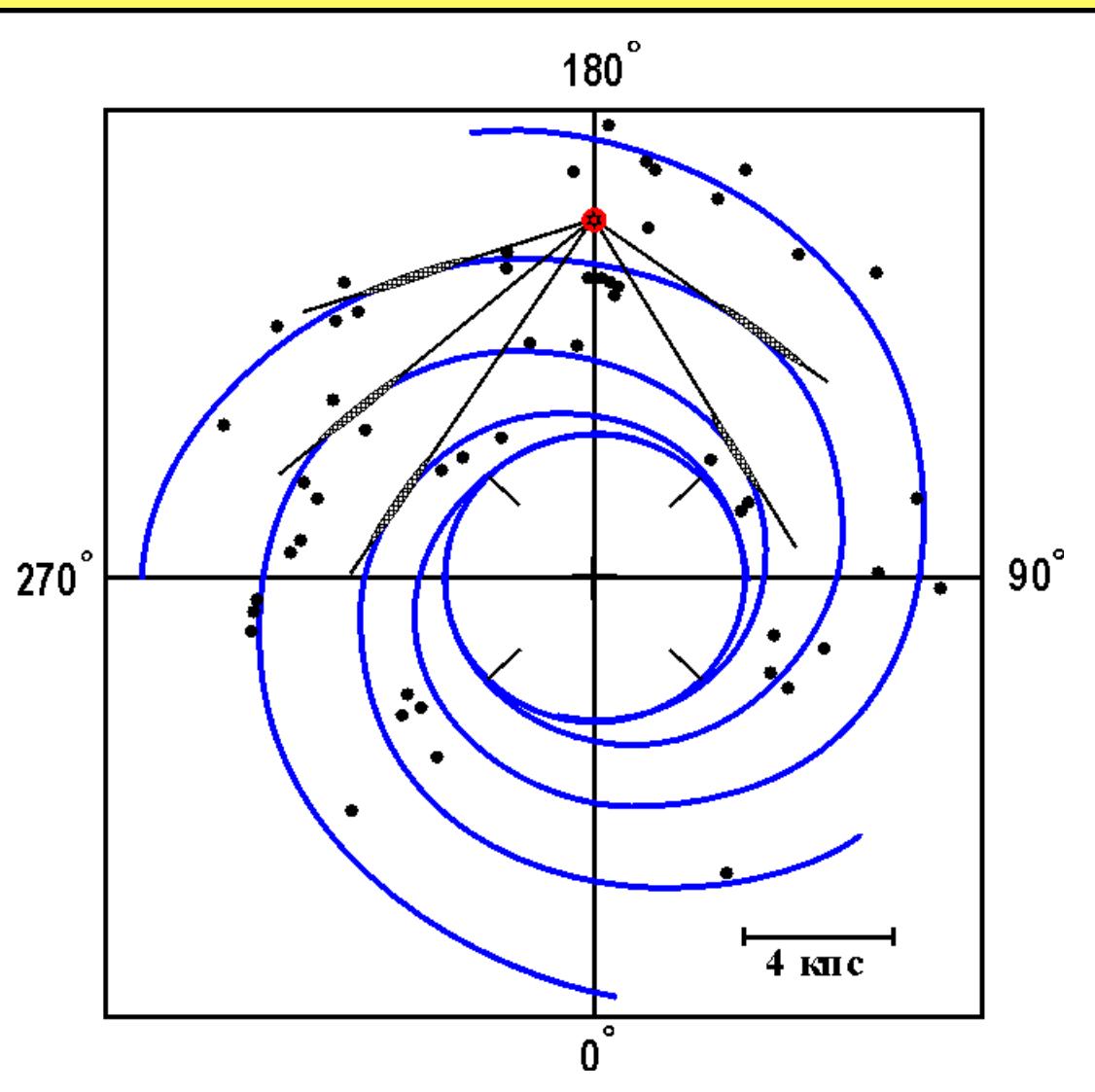
$E = 10^{27} - 10^{28}$ Дж - энергии

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

Происхождение комет в Галактике

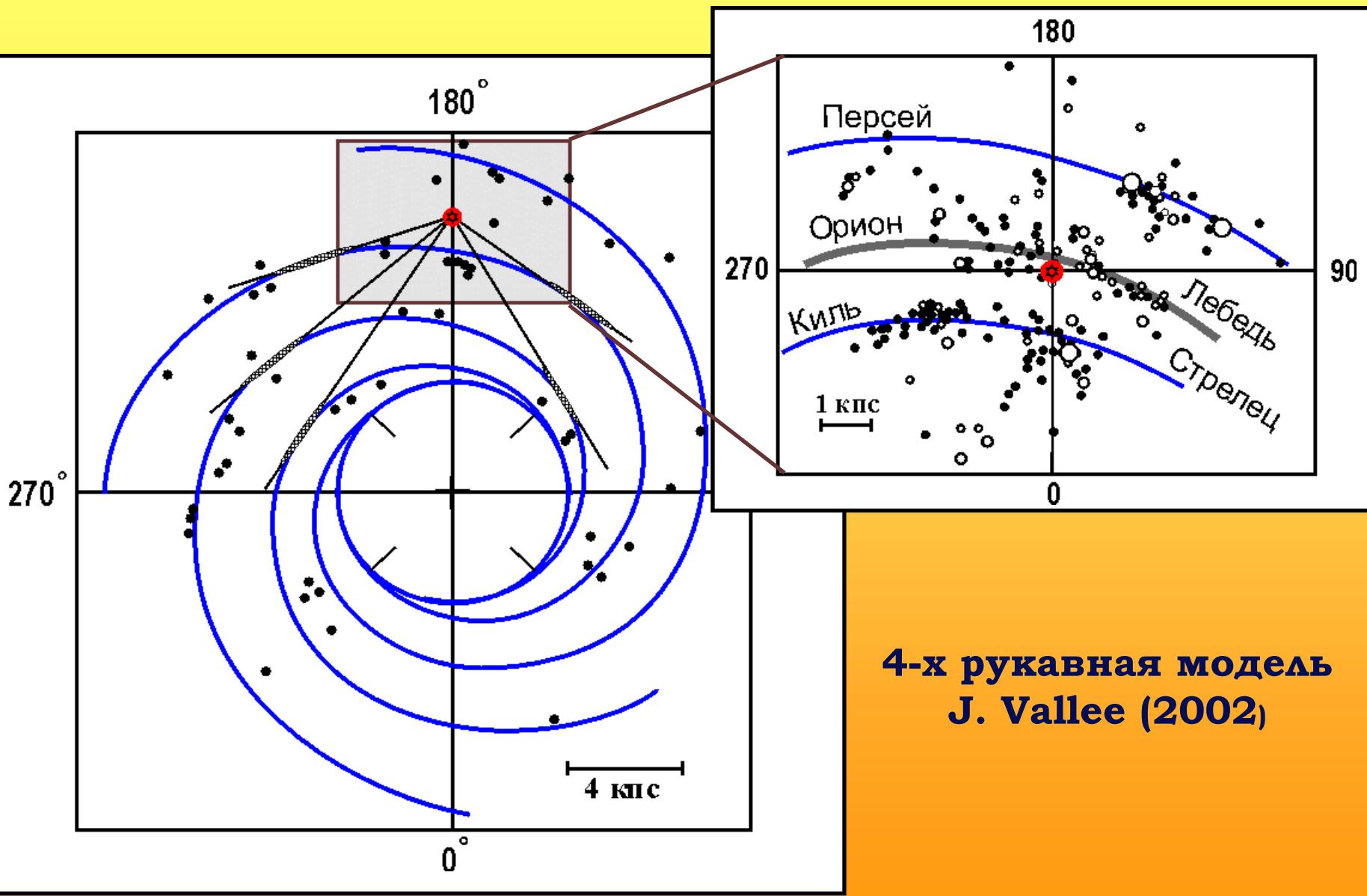
**Явление струйного истечения
Джинса-Каптейна**

Сpirальная структура Галактики

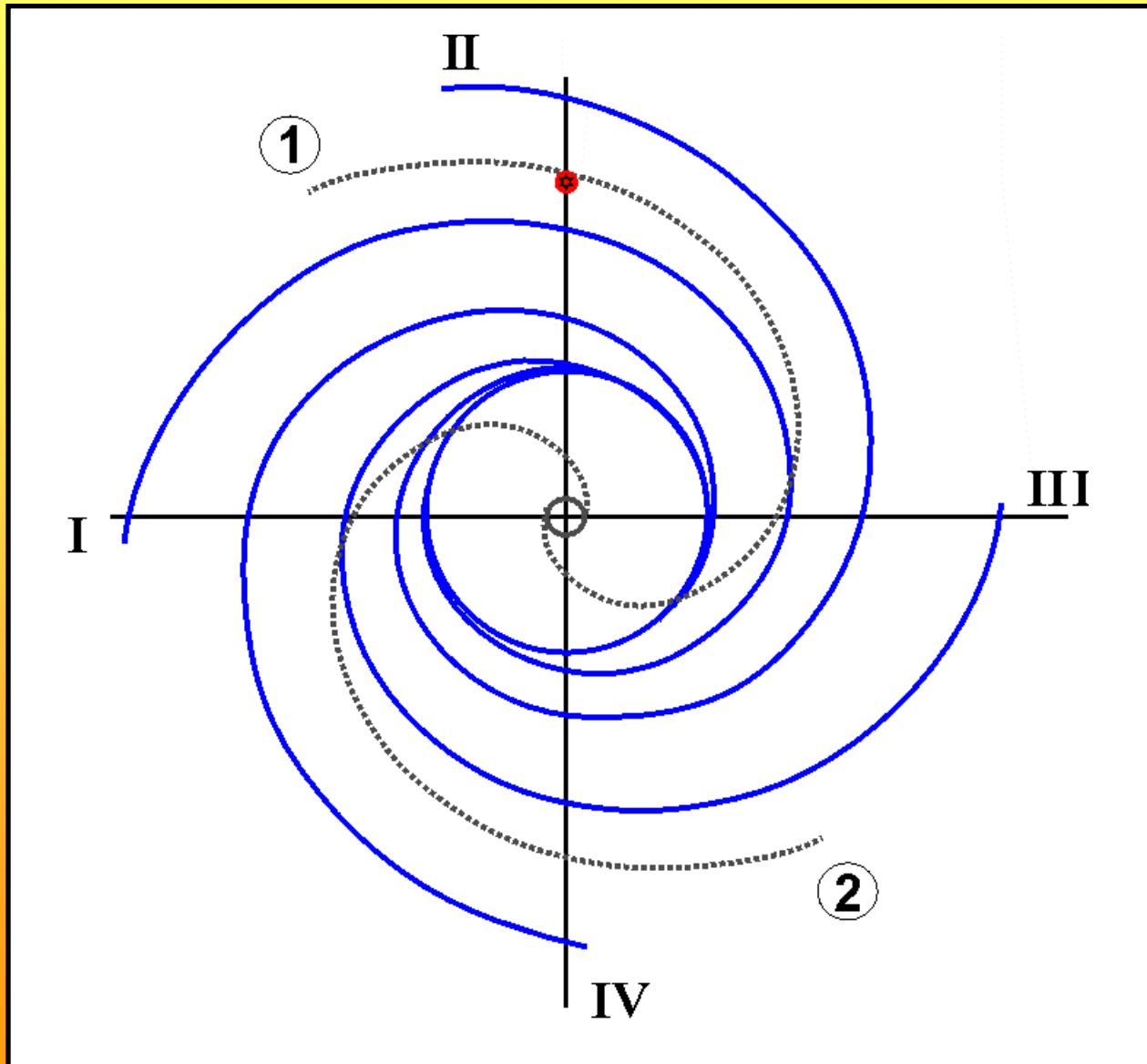


4-х рукавная модель
J. Vallee (2002)

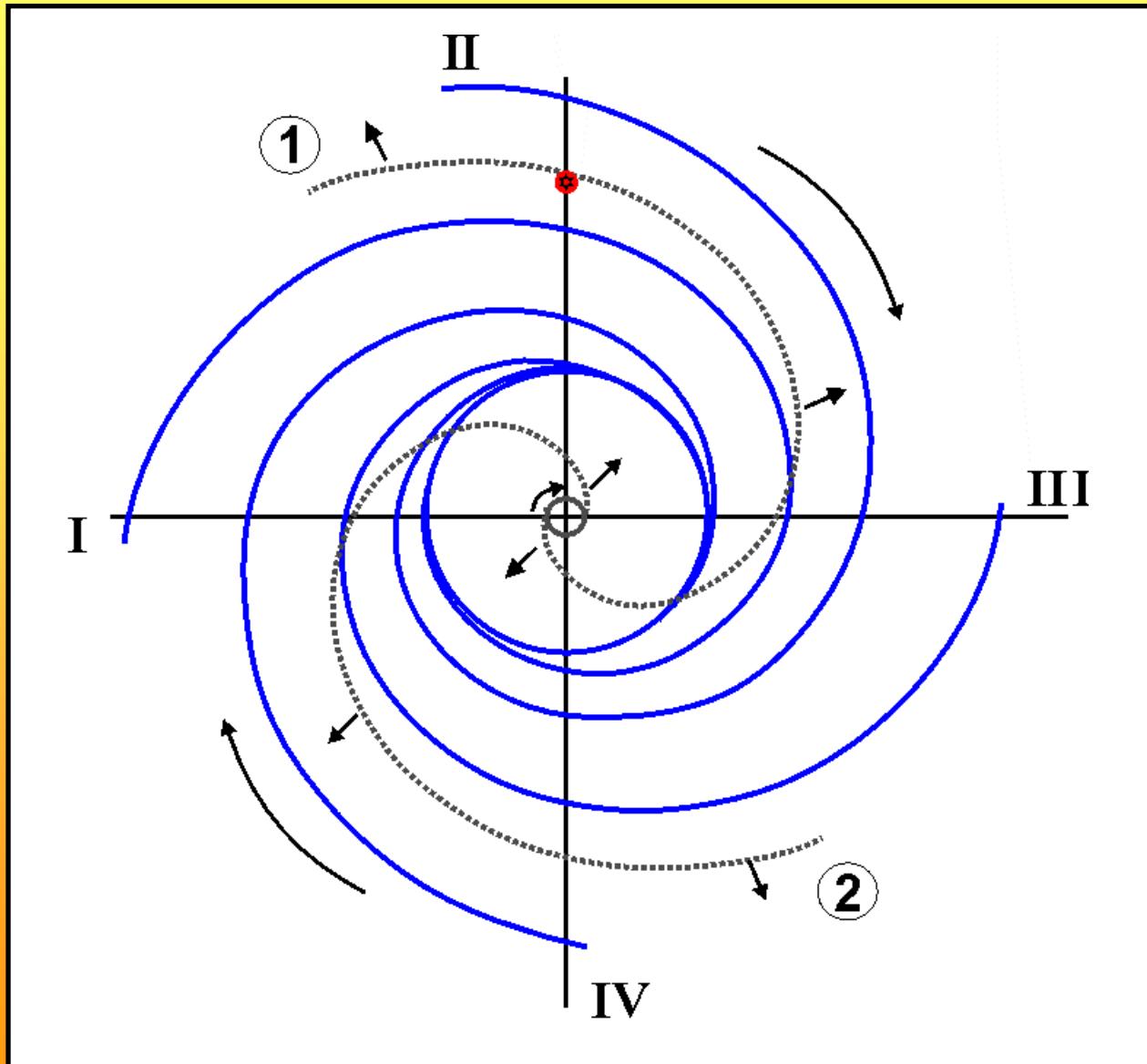
Сpirальная структура Галактики



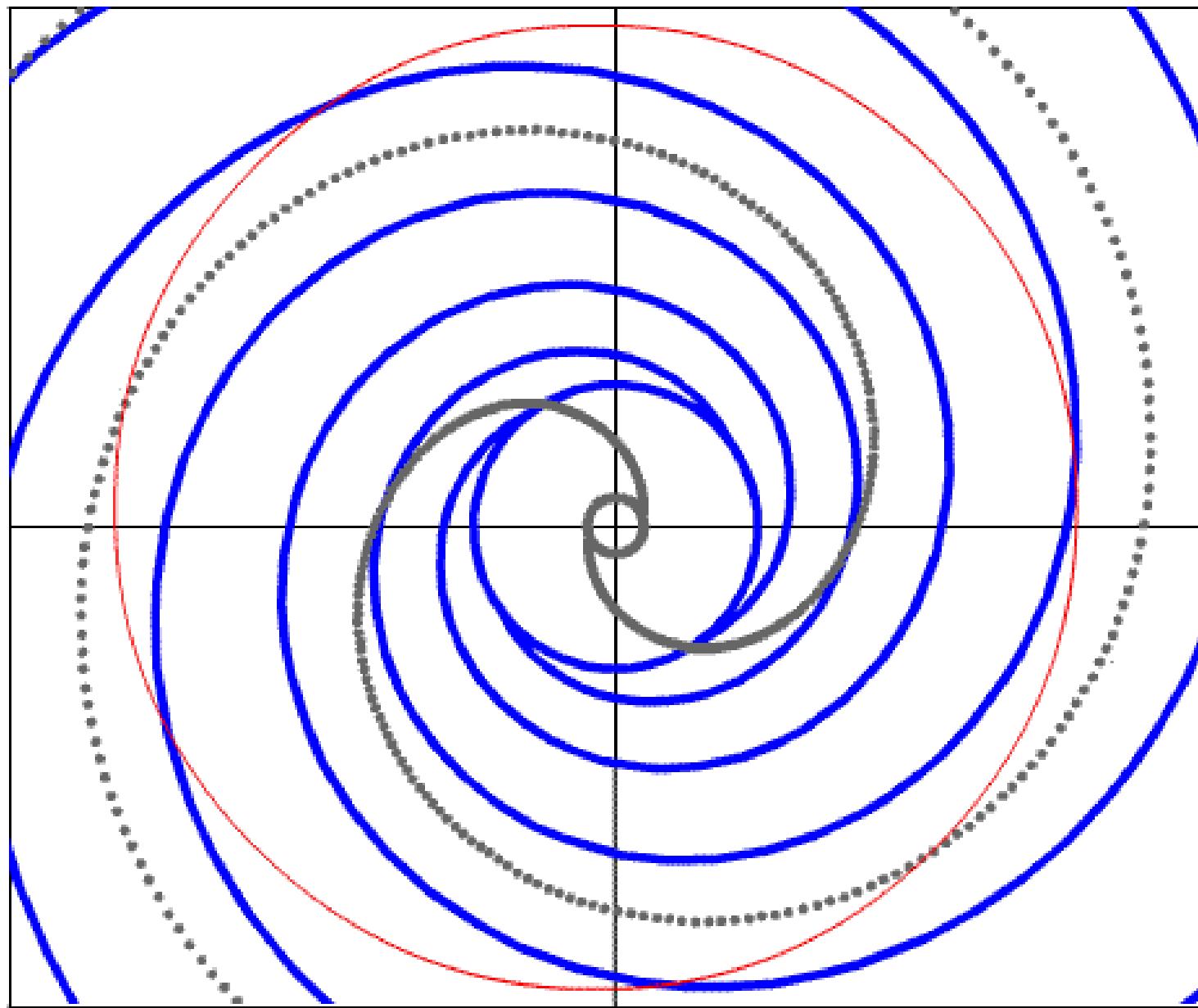
Двуспиральная модель Галактики



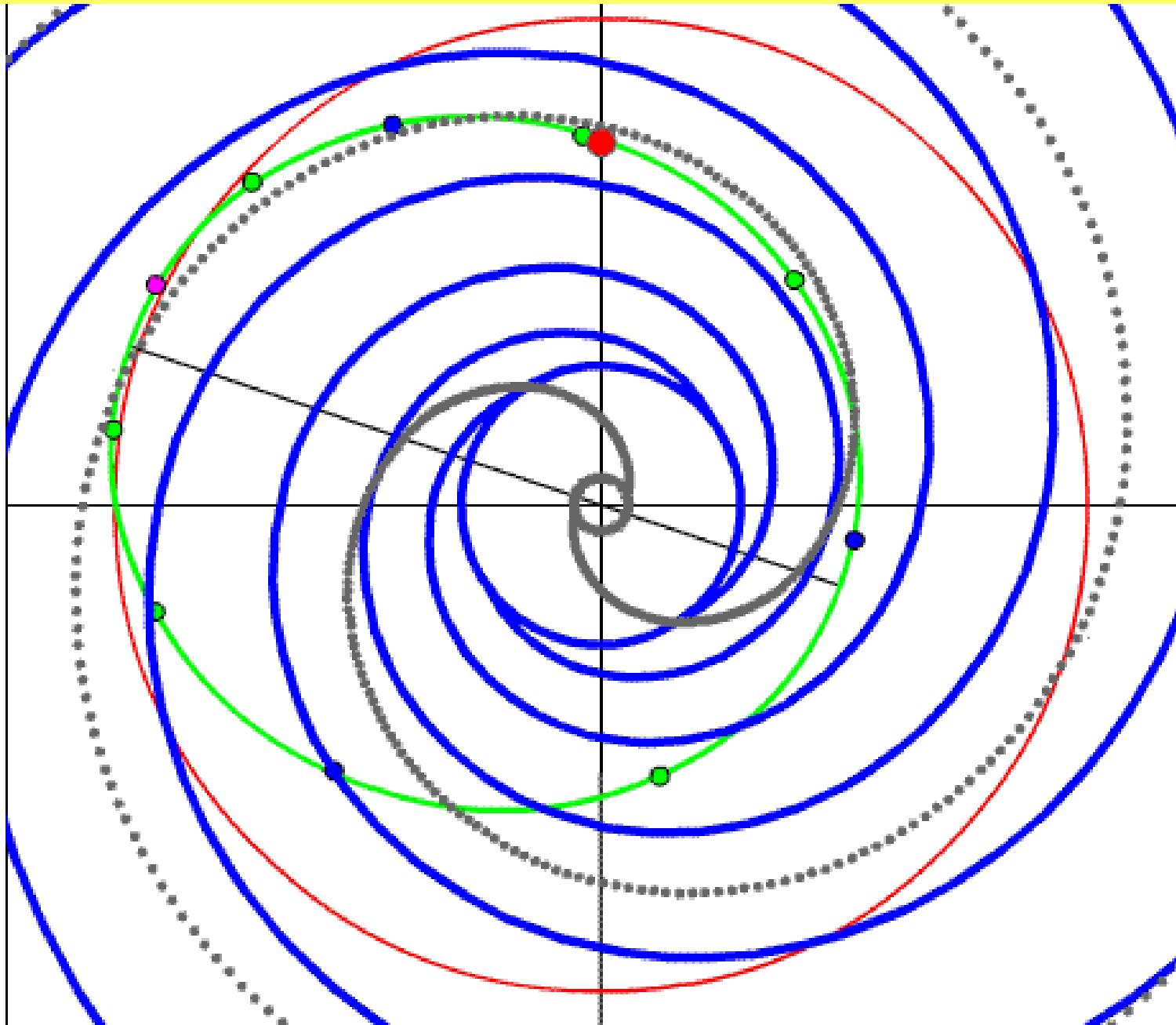
Двуспиральная модель Галактики



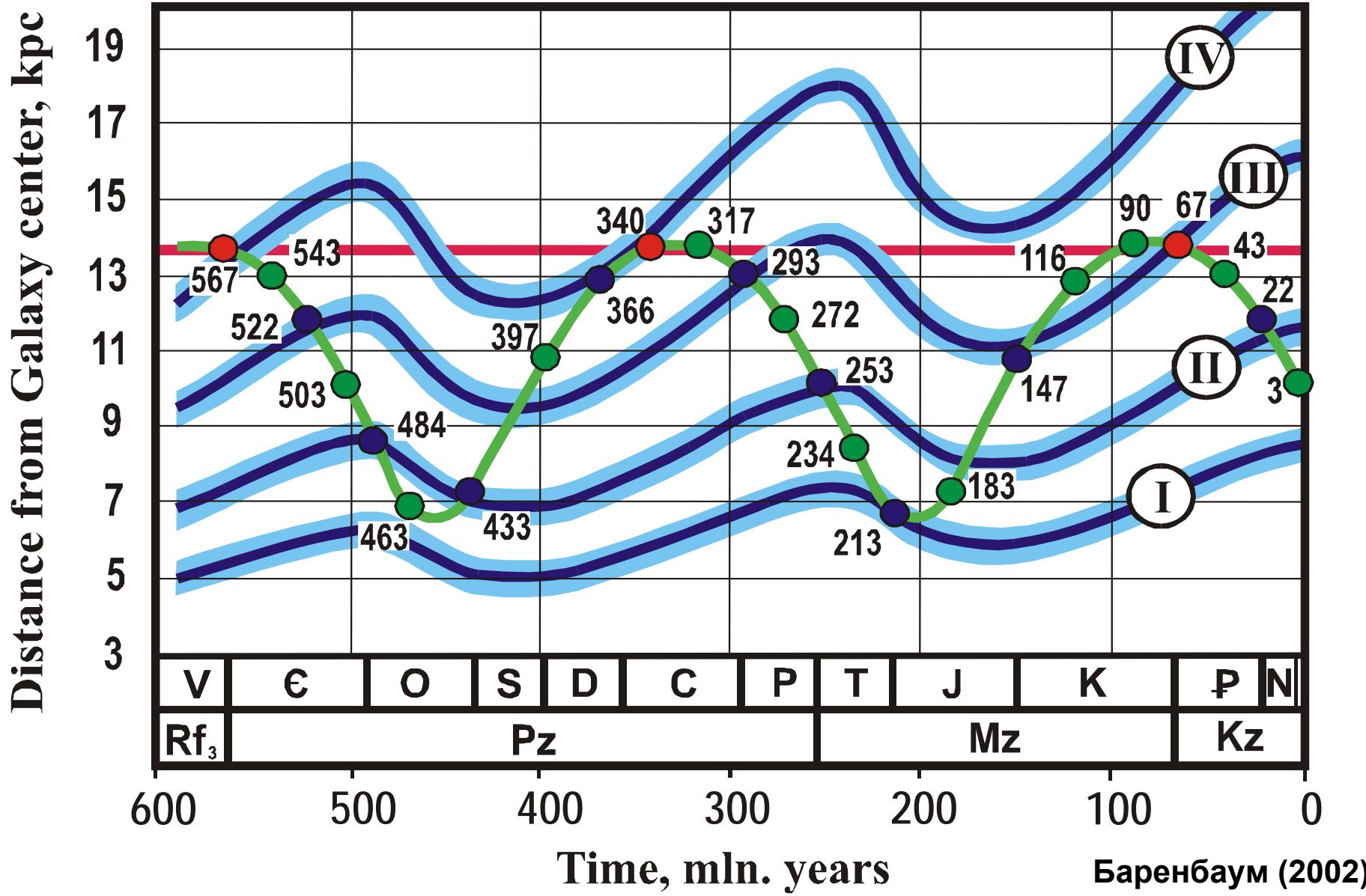
Динамическая модель спиральности Галактики



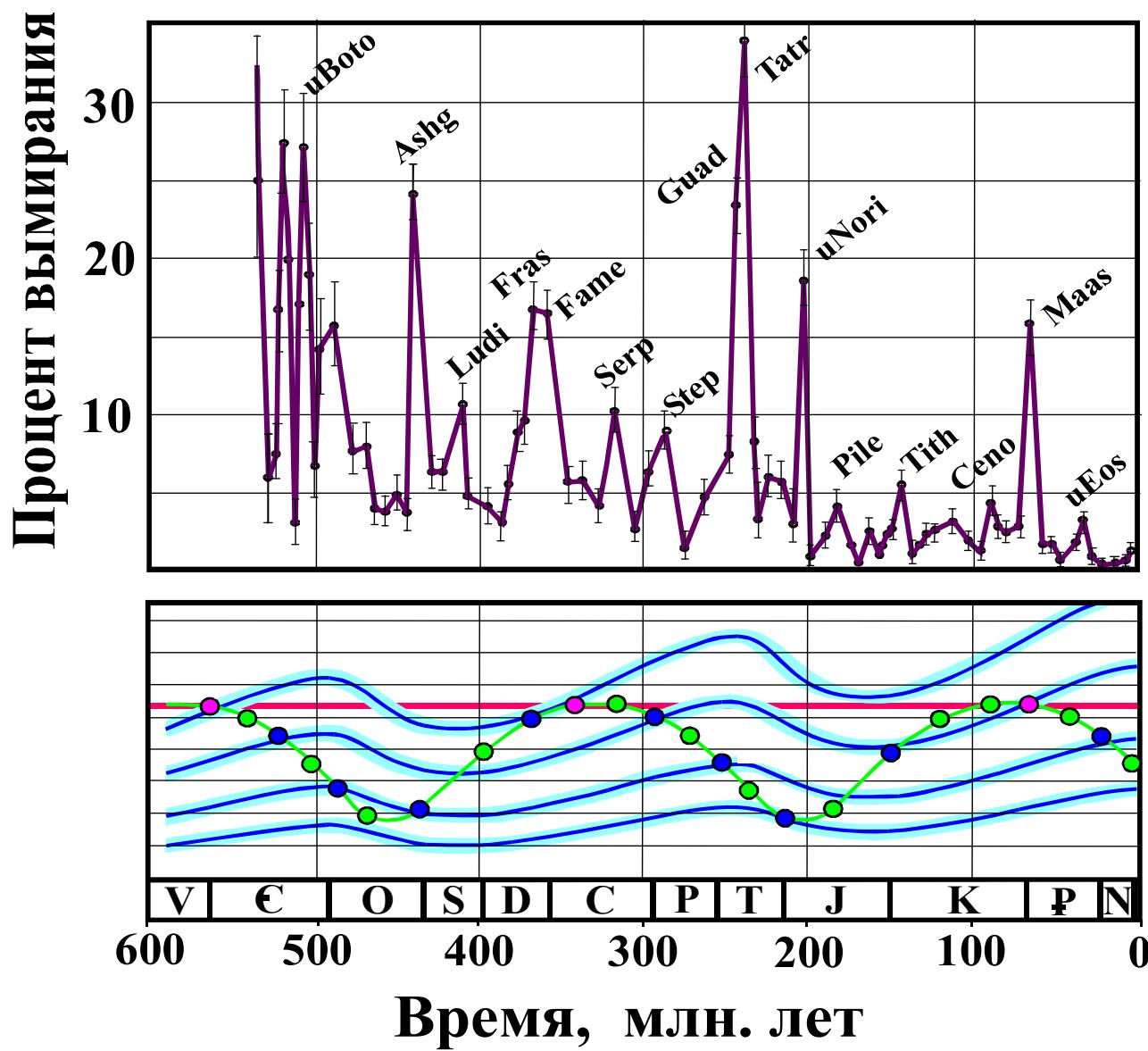
Галактическая модель геологической цикличности



Времена кометных бомбардировок
Обратная задача геохронологической шкалы фанерозоя



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



**Сопоставление эпох массового вымирания биоты
(Sepkoski, 1995) с расчетами (Баренбаум, 1991, 2002)**

Эпоха МВ	Уровень МВ	Возраст границ веков, млн. лет	Расчет, млн. лет
Плиоцен		5.3÷1.8	3
Граница олигоцен–миоцен		23.8	22
Средний эоцен–приабонский век		37.0	43
Маастрихт–даний	BMB	65.0±0.1	67
Сеноман–турон		93.5±0.2	90
Баррем–апт		121.0±1.4	116
Киммеридж–титон		150.7±3.0	147
Плинсбах–тоар		189.6±4.1	183
Норий–рэт	BMB	209.6±4.1	213
Анизий–ладин		234.3±4.6	234

**Сопоставление эпох массового вымирания биоты
(Sepkoski, 1995) с расчетами (Баренбаум, 1991, 2002)**

Татарский–грисбахский века	BMB	248.2±4.8	253
Сакмарский–артинский века		269	272
Стефанский век		303÷290	293
Серпуховский–башкирский века		323	317
Турне–визе	(BMB)	342	340
Фран–фамен	(BMB)	364	366
Лудловский век		423÷419	397
Ашгилл–лландовер	BMB	443	433
Лланвирн–лландейло		464	463
Тремадок – арениг		485	484
Дресбахский век		505÷495	503
Ленский (ботомгский) век		524÷518	522
Томмотский век		534÷530	543
Граница фанерозоя до 1993г		570±15	567

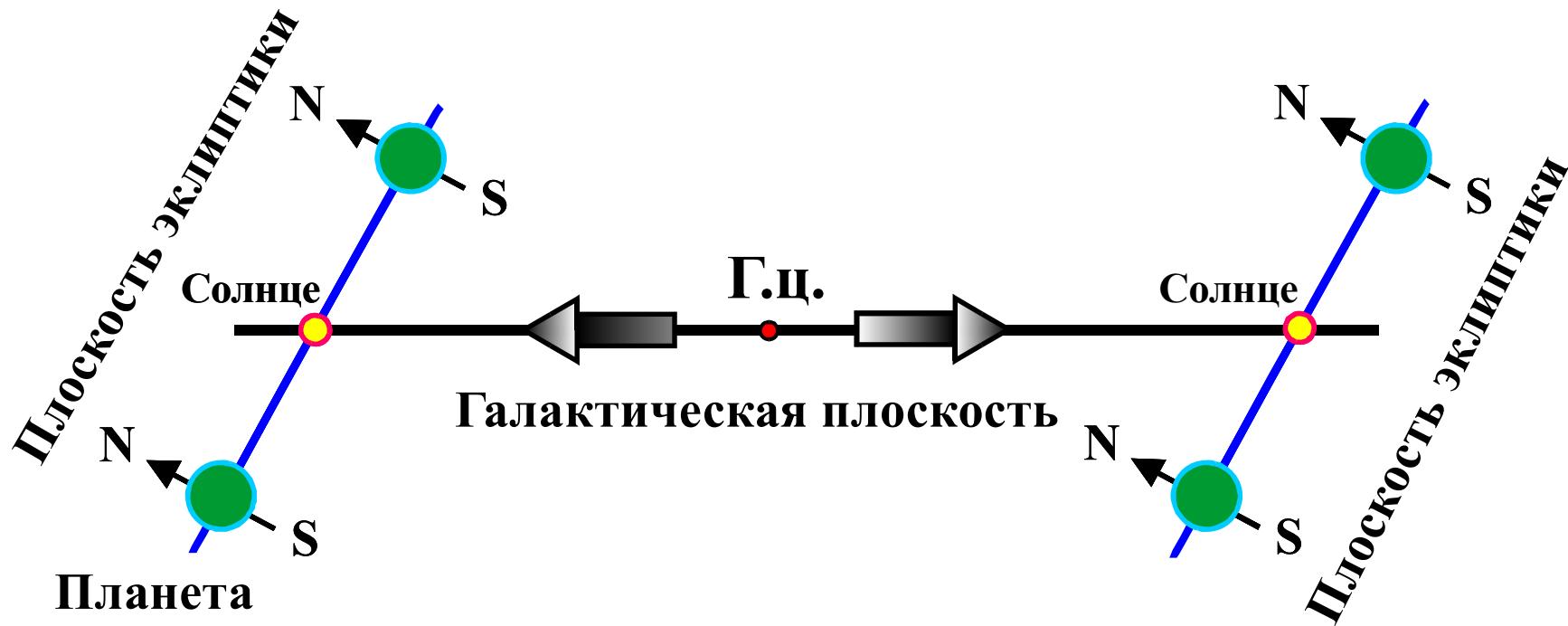
Сопоставление времен орогенических фаз Штилле и эпох массового вымирания живых организмов

Фаза Штилле Моралев, Васильев (1999)	Время, млн. лет	Эпоха МВ Sepkoski (1995)	Время, млн. лет	Разность, млн. лет
Пасаденская	3.6	Плиоцен	5.3–1.8	-1.7
Савская	23.8	Олигоцен-миоцен	23.8	0
Пиренейская	33.7	Эоцен-приабон	37.0	-3.3
Ларамийская	65.0	Маастрихт	71.3–65.0	-3.1
Субгерцинская	85.8	Сеноман-турон	93.5	-7.7
Австрийская	98.9	(Альб-сеноман)?	98.9	0
?	(113±2)?	Барем-апт	121.0	-8.0
Андская	142.0	Кимеридж-титон	150.7	-8.7
Новокиммерийская	154.1	Келовей	164.4-	-7.8
Адыгейская	159.4		159.4	-2.5
?	(180±3)?	Плинсбах-тоар	189.6	-9.6
Древнекиммерийская	201.9	Норий-рэт	209.6	-7.7

Сопоставление времен орогенических фаз Штилле и эпох массового вымирания живых организмов

Лабинская	227.4	Анзий-ладин	234.3	-6.9
Пфальцская	244.8	Татарский-грисбах	248.2	-4.6
Заальская	256	Сакмар-артинск	269	-13
Уральская	290	Стефанский век	303-290	-6.5
Судетская	323	Серпуховский век	327-323	-2
Саурская	335	(Турне-визе)	342	-7
Бретонская	354	(Фран-фамен)	364	-10
Эрийская	417	Лудловская эпоха	423-419	-4
Таконская	443	Ашгилл	449-443	-3
Трондьемская	458	Лланвирн-лландейло	464	-6
Трюсильская	485	Тремадок-арениг	485	0
Богемская	495	Дресбахский век	505-495	-5
Салаирская	505	Ленский век	524-518	-16

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

$$\varphi_{\max} = -\operatorname{tg}\vartheta \cdot \operatorname{tg}\delta, \text{ где } \varphi_{\max} \text{ определяется из условия } I(\varphi_{\max}) = 0.$$

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

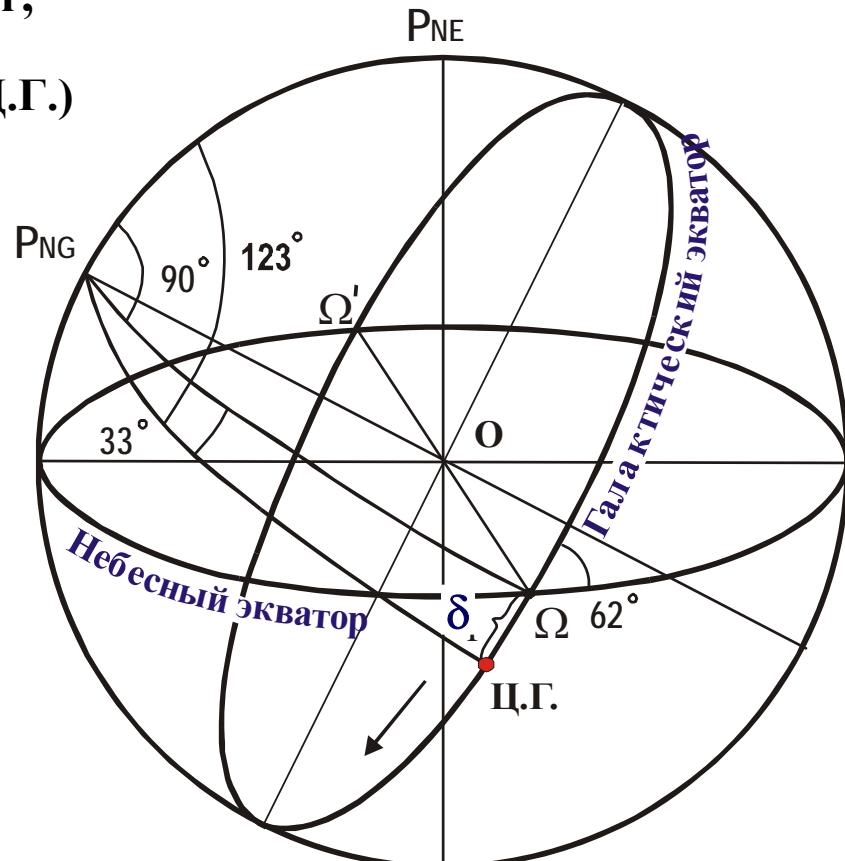
I_0 – плотность потока галактических комет;

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

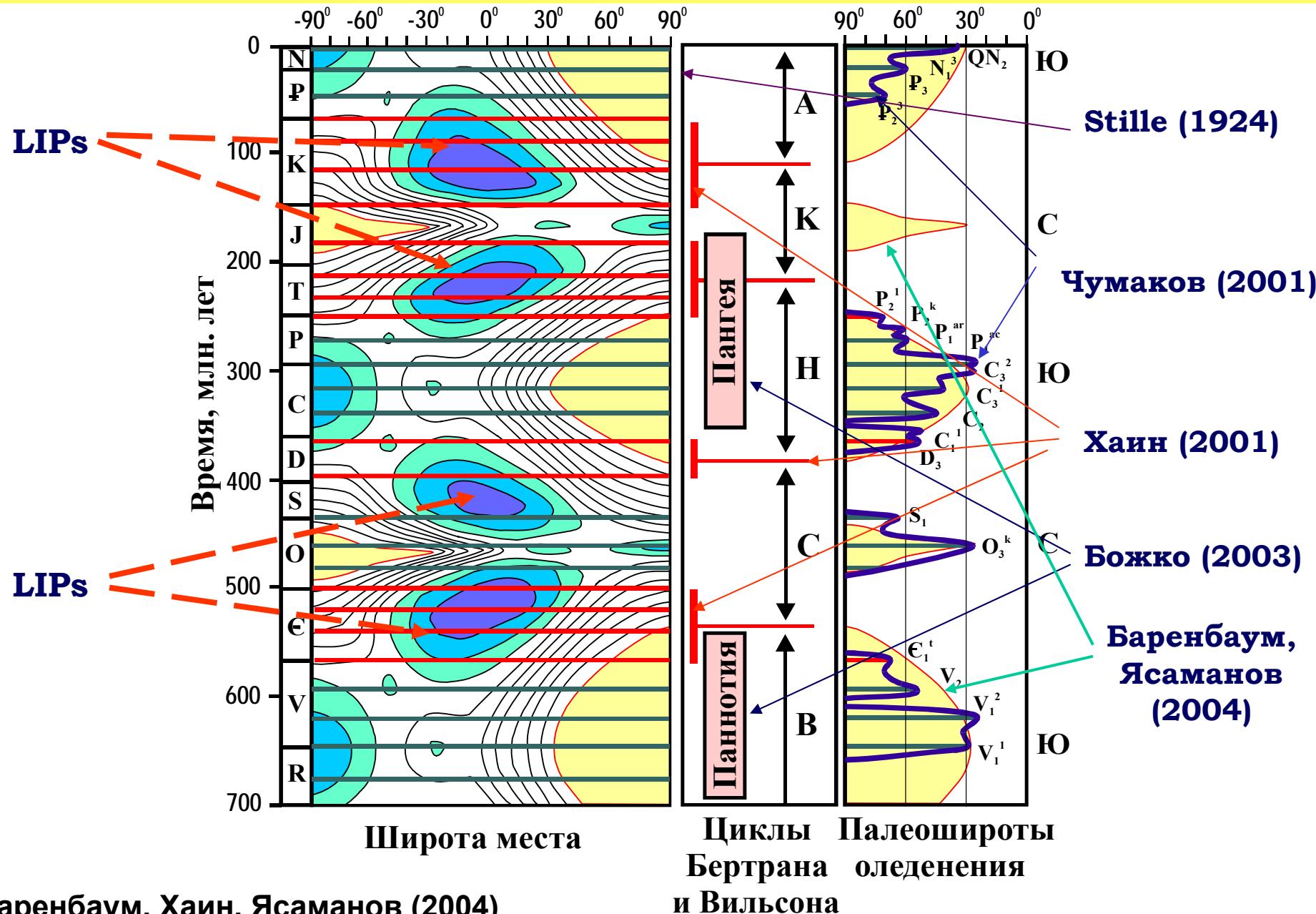
φ – часовой угол;

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

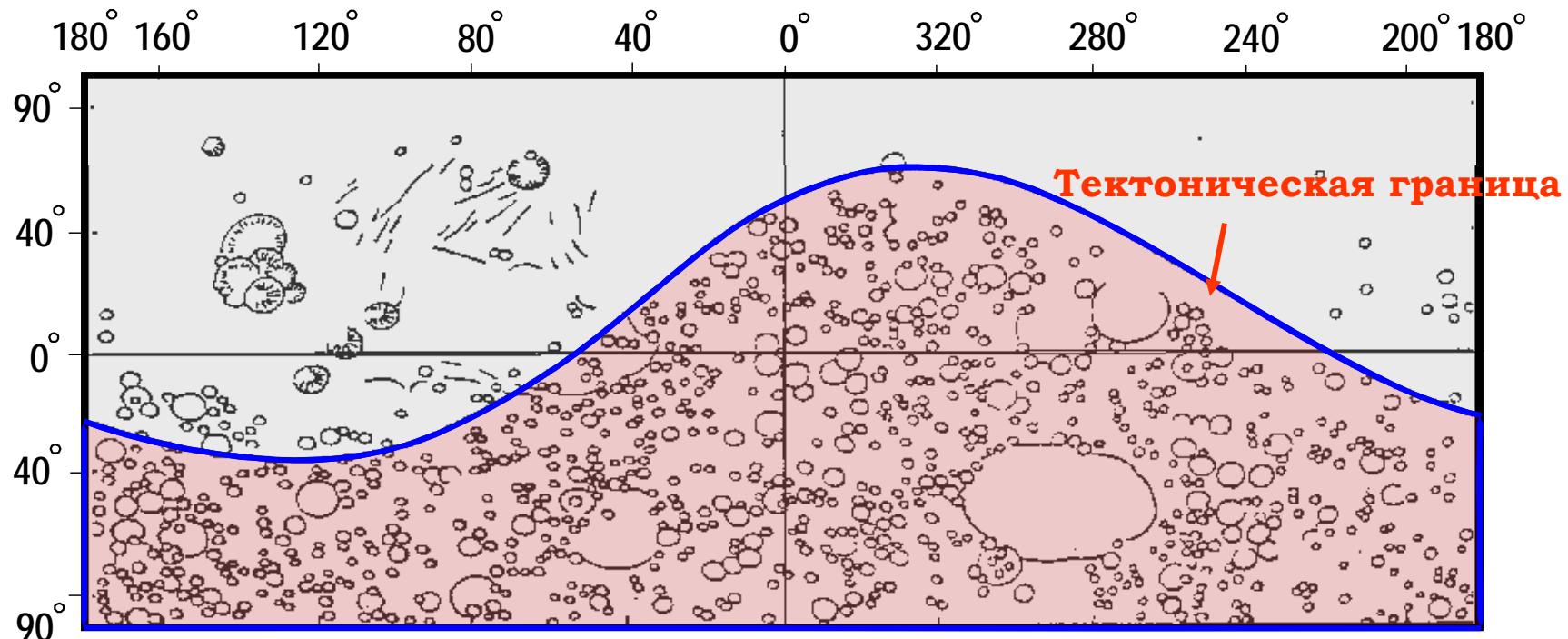


Планетарные геодинамические и климатические процессы на Земле, вызванные падениями галактических комет



Карта рельефа поверхности Марса

Морское полушарие

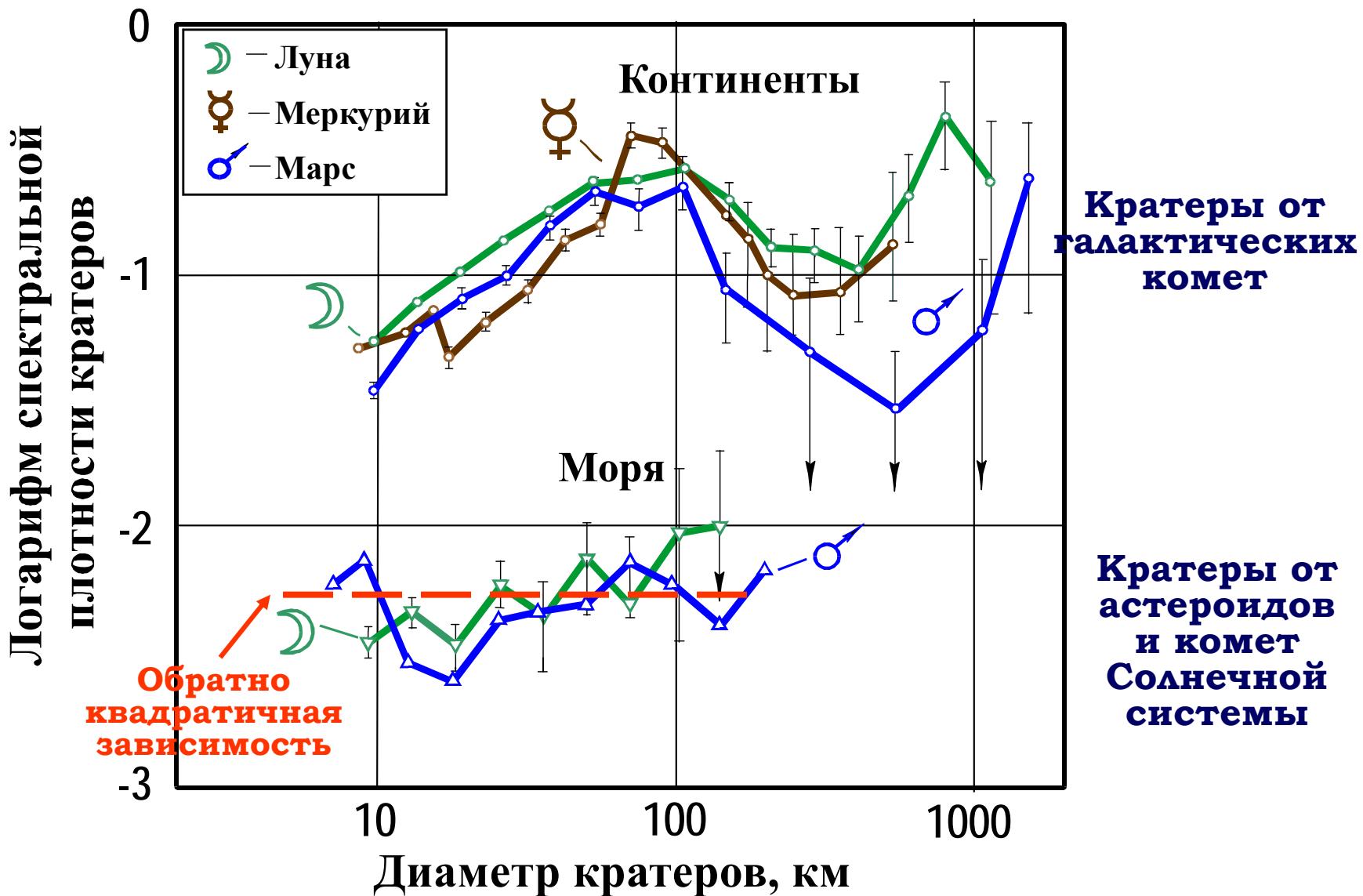


Континентальное полушарие

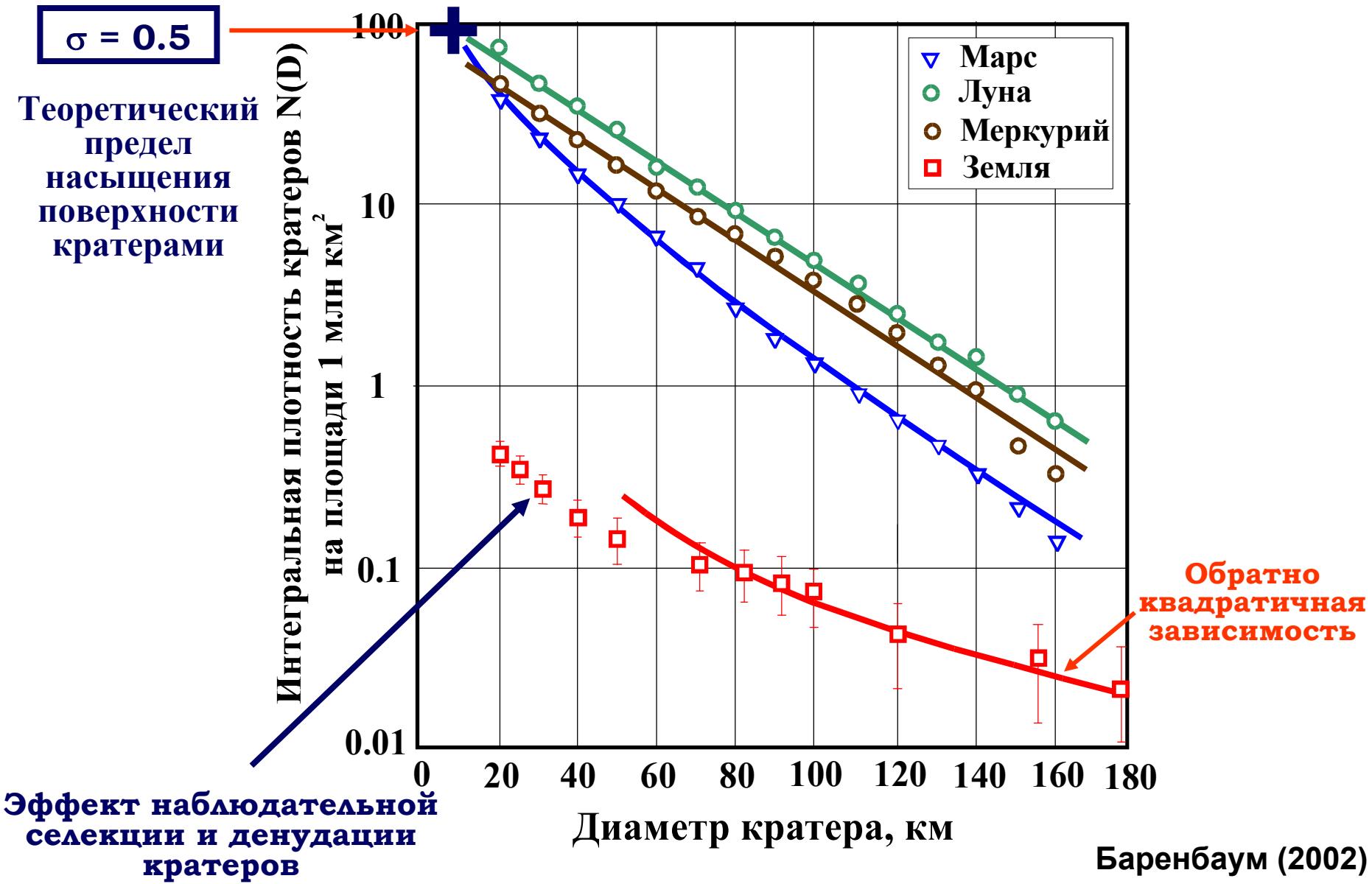
Южное «континентальное» полушарие сильно кратерировано и приподнято над северным «морским» полушарием на 2-6 км.

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

Распределение кратеров по диаметрам на Луне, Марсе и Меркурии



Интегральная плотность кратеров на Луне, Марсе, Меркурии и Земле



Изменение массы галактических комет в атмосфере планет

Классическая теория абляции

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\Gamma A \rho_K V^2}{M^{1/2} \rho^{2/3}}; \quad \frac{dM}{dt} = \frac{\Lambda A M^{2/3} \rho_K V^3}{2Y \rho^{2/3}}; \quad M = M_0 \exp \left[-\frac{\mu}{2} (V_0^2 - V^2) \right]; \quad \mu = \frac{\Lambda}{2\Gamma Y}$$
$$M = \left(\frac{\Lambda A H \rho_K V_0^2}{6Y \rho_K^{2/3} \sin \vartheta} \right)^3$$

Минимальная масса кометы (г), достигающей поверхности

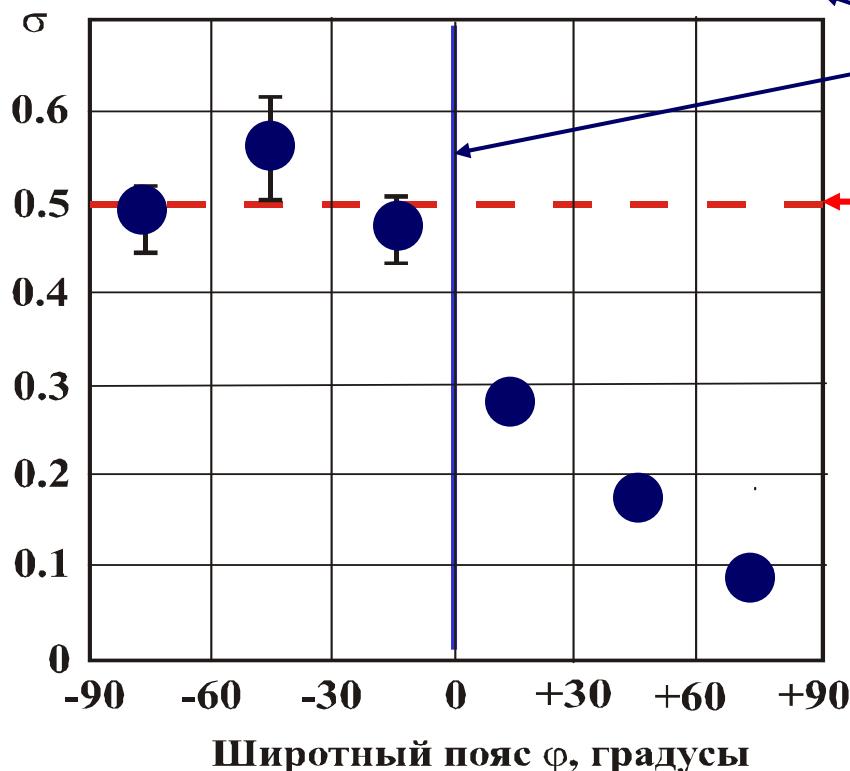
Тип ядра	Угол ϑ	Марс	Земля
Лед	90°	1.65×10^{13}	1.77×10^{18}
	10°	3.15×10^{15}	3.38×10^{21}
Снег	90°	1.65×10^{15}	1.77×10^{20}
	10°	3.15×10^{17}	3.38×10^{23}

$\rho_K \approx 1 \text{ г/см}^3$; $d_K = 100 \div 3500 \text{ м}$; $M_K = 10^{12} \div 10^{17} \text{ г}$; $E_K = 10^{20} \div 10^{25} \text{ Дж}$

Насыщение поверхности Марса кратерами

Доля поверхности под астероидными и кометными кратерами

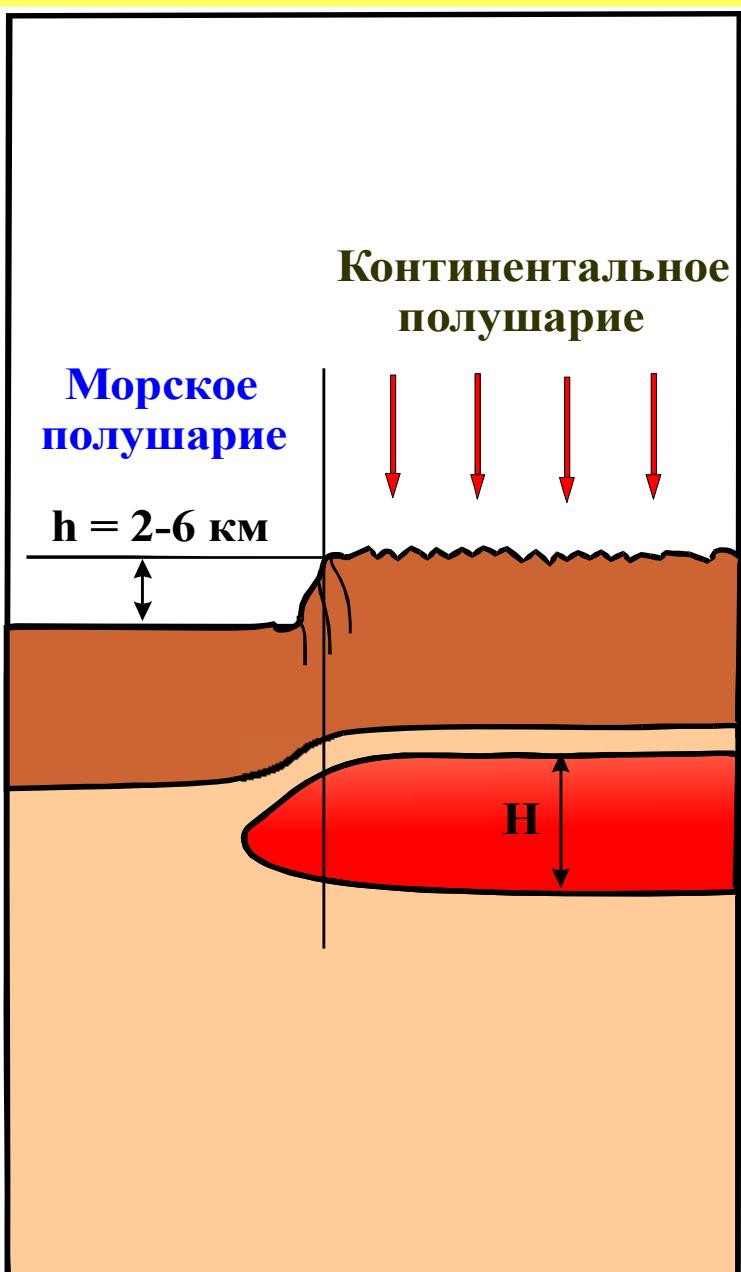
$\Delta\phi$	-90° ... -60°	-60° ... -30°	-30° ... 0°	0° ... +30°	30° ... +60°	60° ... +90°
σ_A	0.003	0.177	0.158	0.167	0.165	0.055
σ_K	0.483	0.392	0.313	0.110	0.022	0.034
$\sigma_A + \sigma_K$	0.486	0.569	0.471	0.277	0.187	0.089



Тектонический экватор
Доля площади под кратерами
при насыщении ими
поверхности

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

Подъем поверхности континентального полушария Марса вследствие нагрева пород астеносферы



Толщина астеносферного слоя

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

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

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

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

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

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

Энергетика образования новейших поднятий

Исходная система уравнений

$$E = (C\rho_S \Delta T + \xi \lambda \rho_S) \cdot H^3$$

$$\Delta H = [\beta \Delta T + \xi (\rho_S / \rho_L - 1)] \cdot H$$

C = 1.2 Дж/г·К° – коэффициент удельной теплоты нагревания

λ = 210 Дж/г – коэффициент удельной теплоты плавления

β = 3·10⁻⁵ (К°)⁻¹ – коэффициент объемного расширения

ξ – степень плавления пород

ρ_S = 3.3 г/см³ и ρ_L = 2.7 г/см³ – плотность пород до и после плавления

Решалась относительно ΔT и ΔH для куба пород со стороной H = 100 км

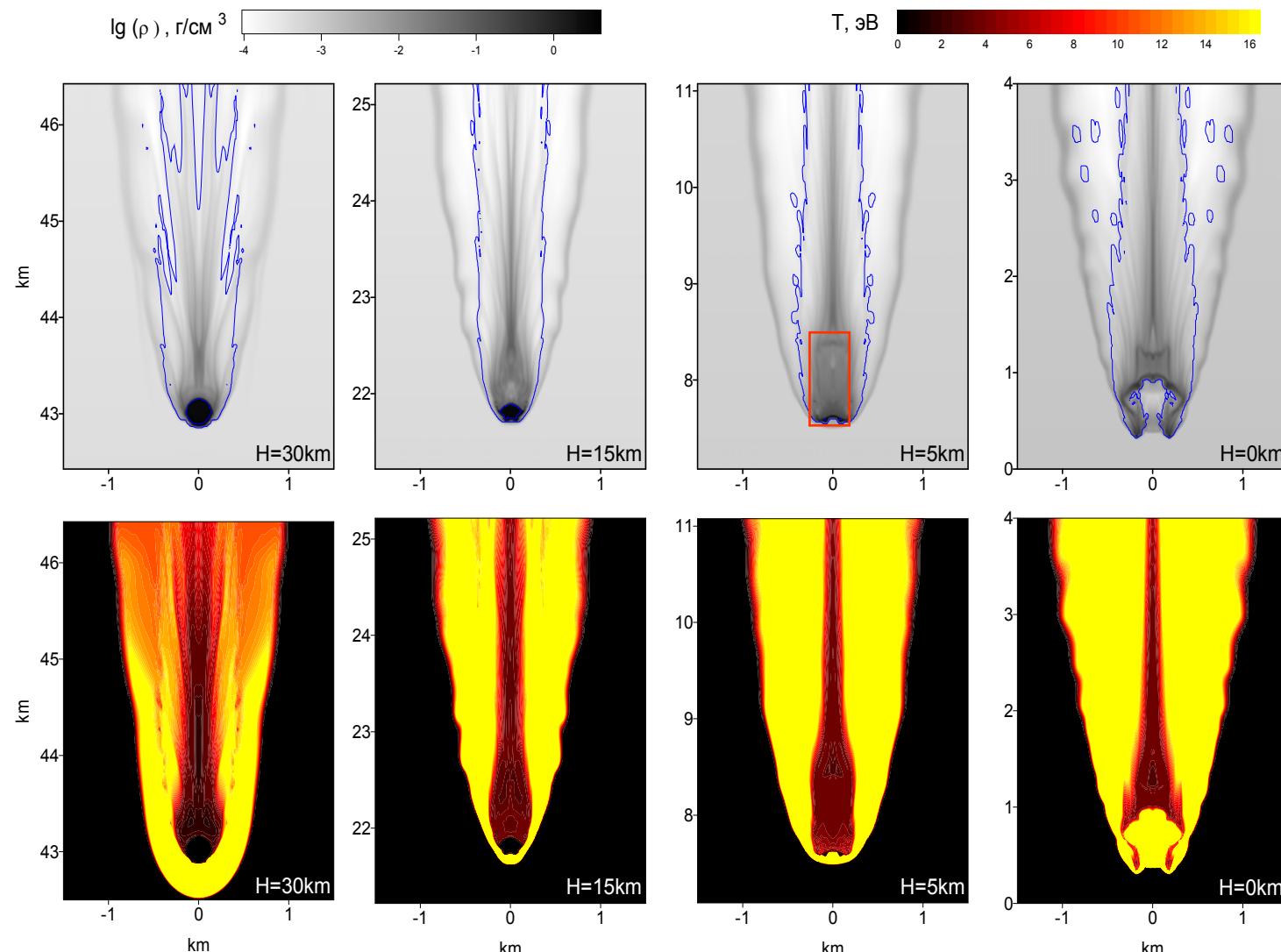
E (Дж)	ΔT (град)	ΔH	ξ (%)
10 ²¹	0.25	75 см	0
10 ²²	2.5	7.5 м	0
10 ²³	25	75 м	0
10 ²⁴	250	750 м	0
4·10 ²⁴	1000	3 км	0
>4·10 ²⁴		22 км	100

Механизм взаимодействия галактических комет с планетами при наличии атмосферы

Земля и другие планеты

**Трех стадийный процесс
взаимодействия комет с Землей
по теории М.А. Лаврентьева**

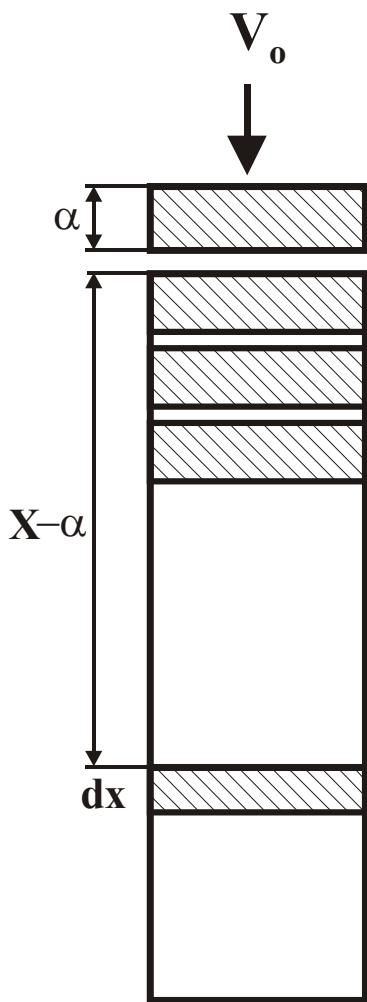
1. Стадия: превращение ГК в атмосфере в газовую струю



Разрушение кометы диаметром 300 м, падающей со скоростью 450 км/с под углом 45°. Показаны распределения плотности (десятичный логарифм плотности, выраженной в г/см³) 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 (1959)



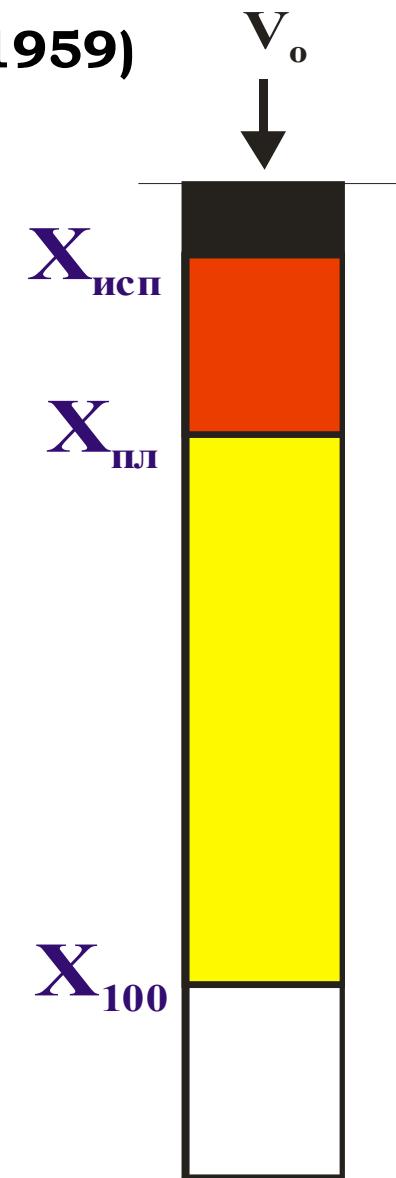
$$(1) \quad \mathbf{x} \cdot d\mathbf{V} + \mathbf{V} \cdot d\mathbf{x} = 0$$

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

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

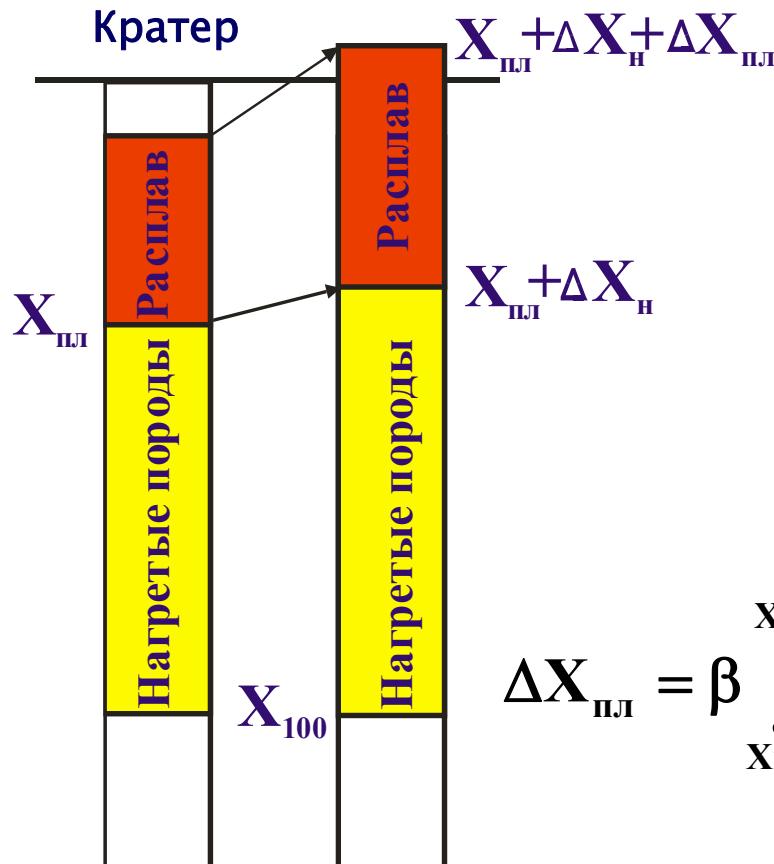
$$(4) \quad U(x) = -dE/dx = \frac{E_0}{x^2}$$

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



3. Стадия: процесс модификации кратера

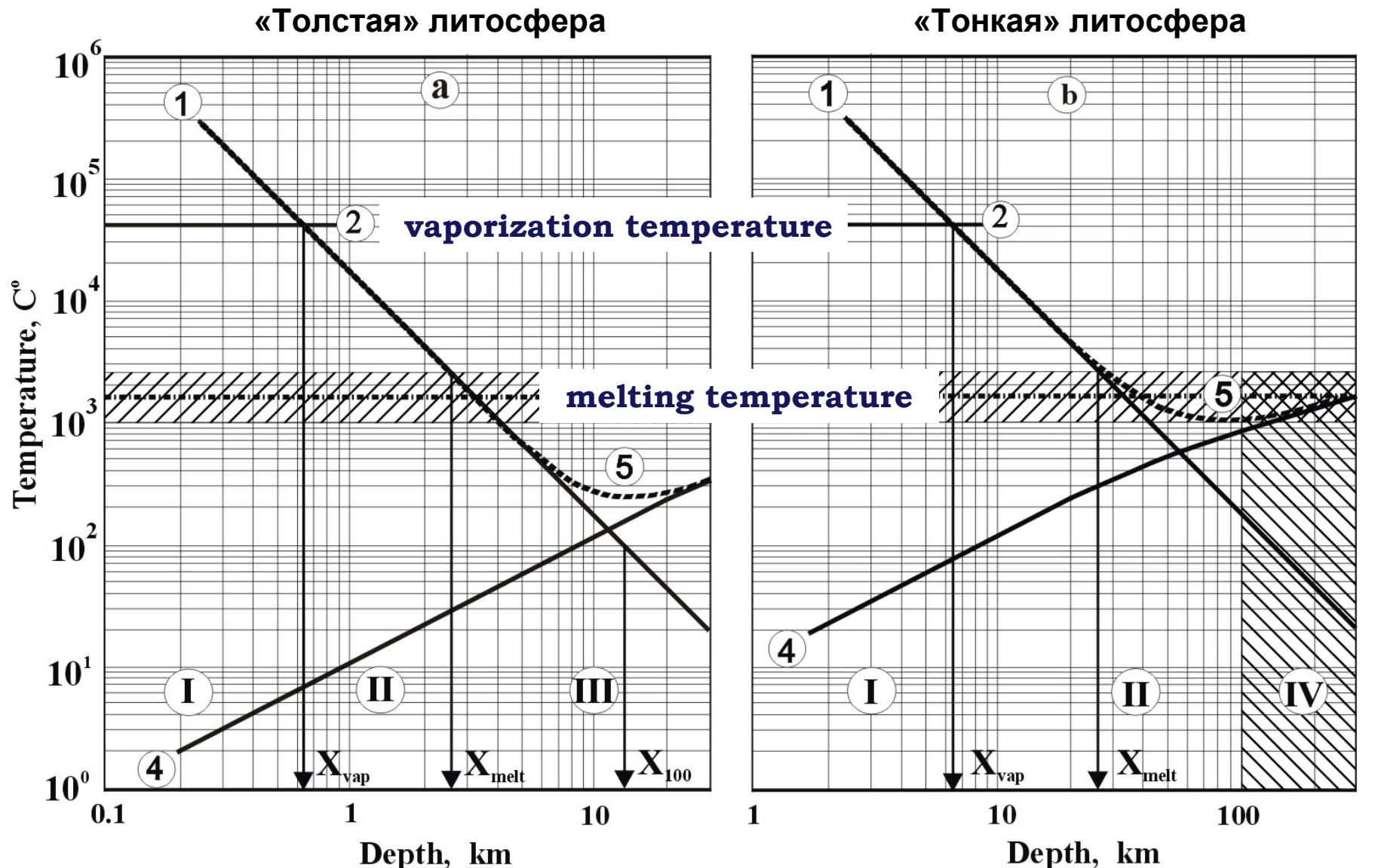
Расширение столба пород при плавлении и нагреве



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

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

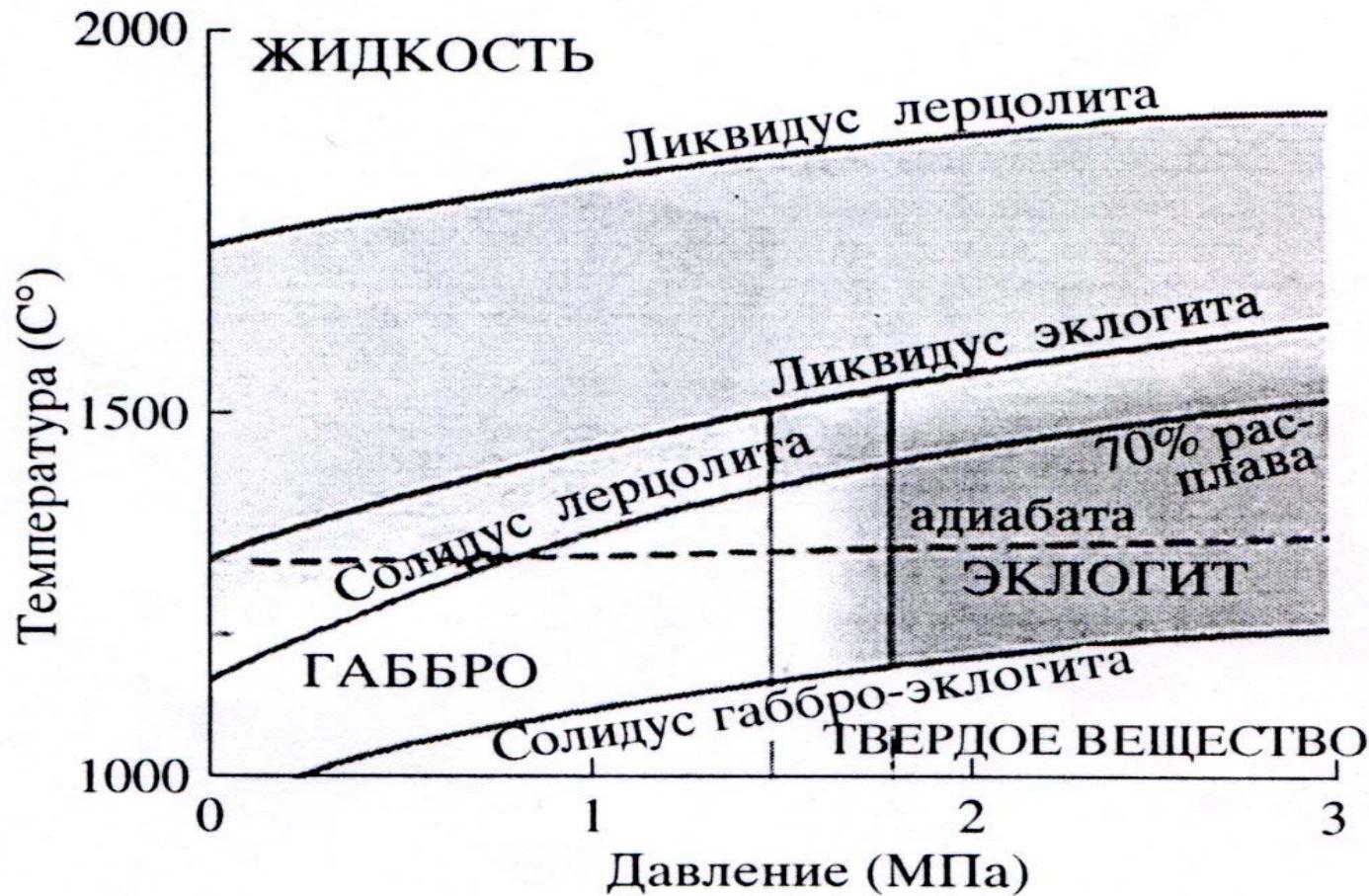
Нагрев пород литосферы кометами диаметром 300 м (а) и 3 км (б)



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

Химические преобразования вещества в условиях нижней коры и верхов мантии по Foulger (2007)

Дифференциация вещества в астеносфере



Габбро (плотность 2.87 г/см³) – всплывает
Эклогит (плотность 3.45 г/см³) – тонет

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 $Z_{\text{л}} = Q / (\pi \lambda d^2 T_{\text{исп}})$	$\sim 1 \text{ см}$

Галактические кометы

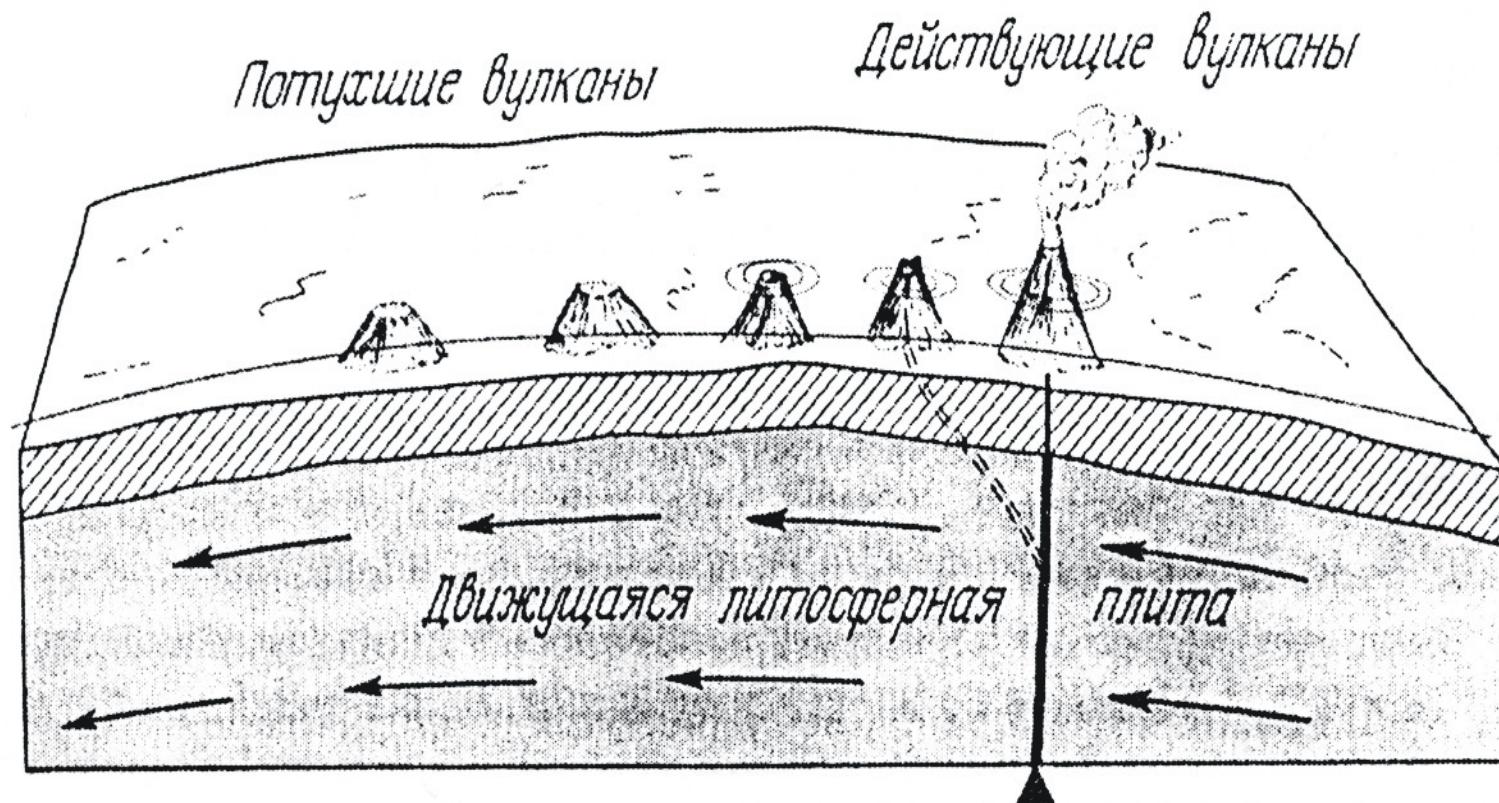
Энергия галактической кометы	$\sim 10^{20} \div 10^{25} \text{ Дж}$
Диаметр ядра галактической кометы	$\sim 100 \text{ м} \div 3.5 \text{ км}$
Плотность энергии на мишени Q/d^2	$\sim 10^{12} \div 10^{14} \text{ (Дж/см}^2\text{)}$
Глубина кратера $Z_{\text{к}} = Q / (\pi \lambda d^2 T_{\text{исп}})$	$\sim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

ЗЕМЛЯ

Падения комет в океаны и на континенты

Одиночные и коллективные эффекты

Образование подводных хребтов - эффект горячей точки

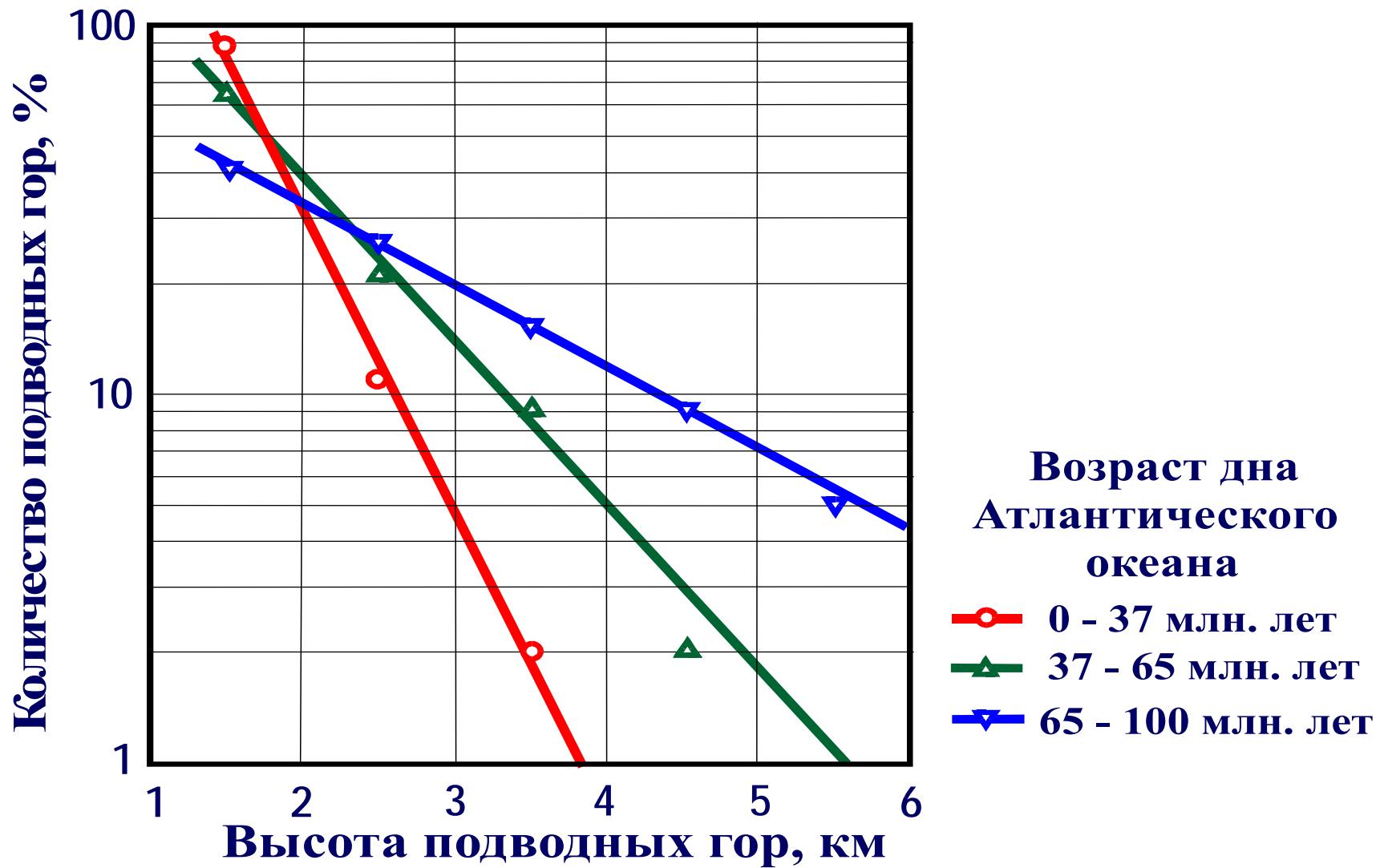


Мантийный пломб
(горячая точка)

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

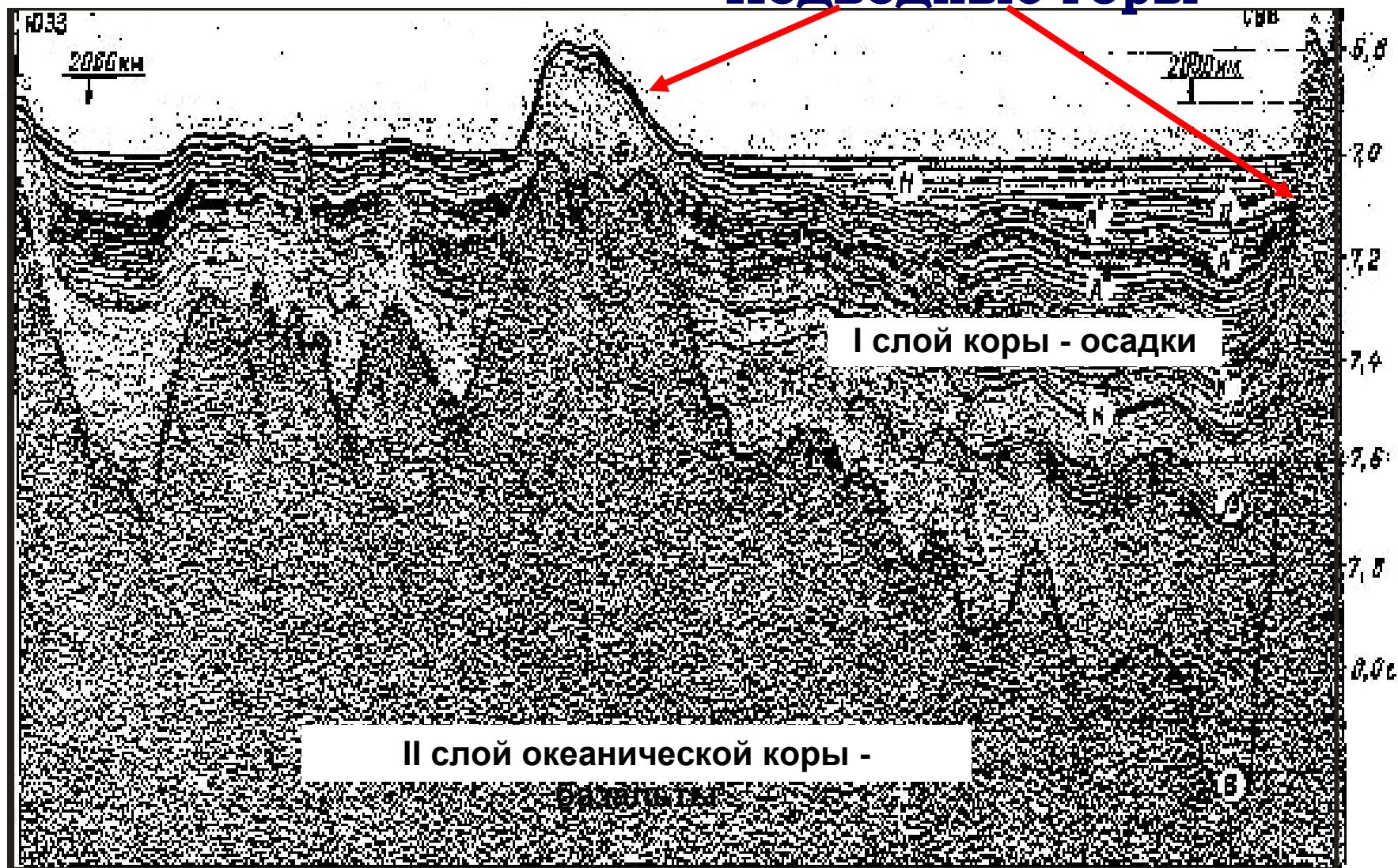


Возраст дна
Атлантического
океана

- 0 - 37 млн. лет
- 37 - 65 млн. лет
- 65 - 100 млн. лет

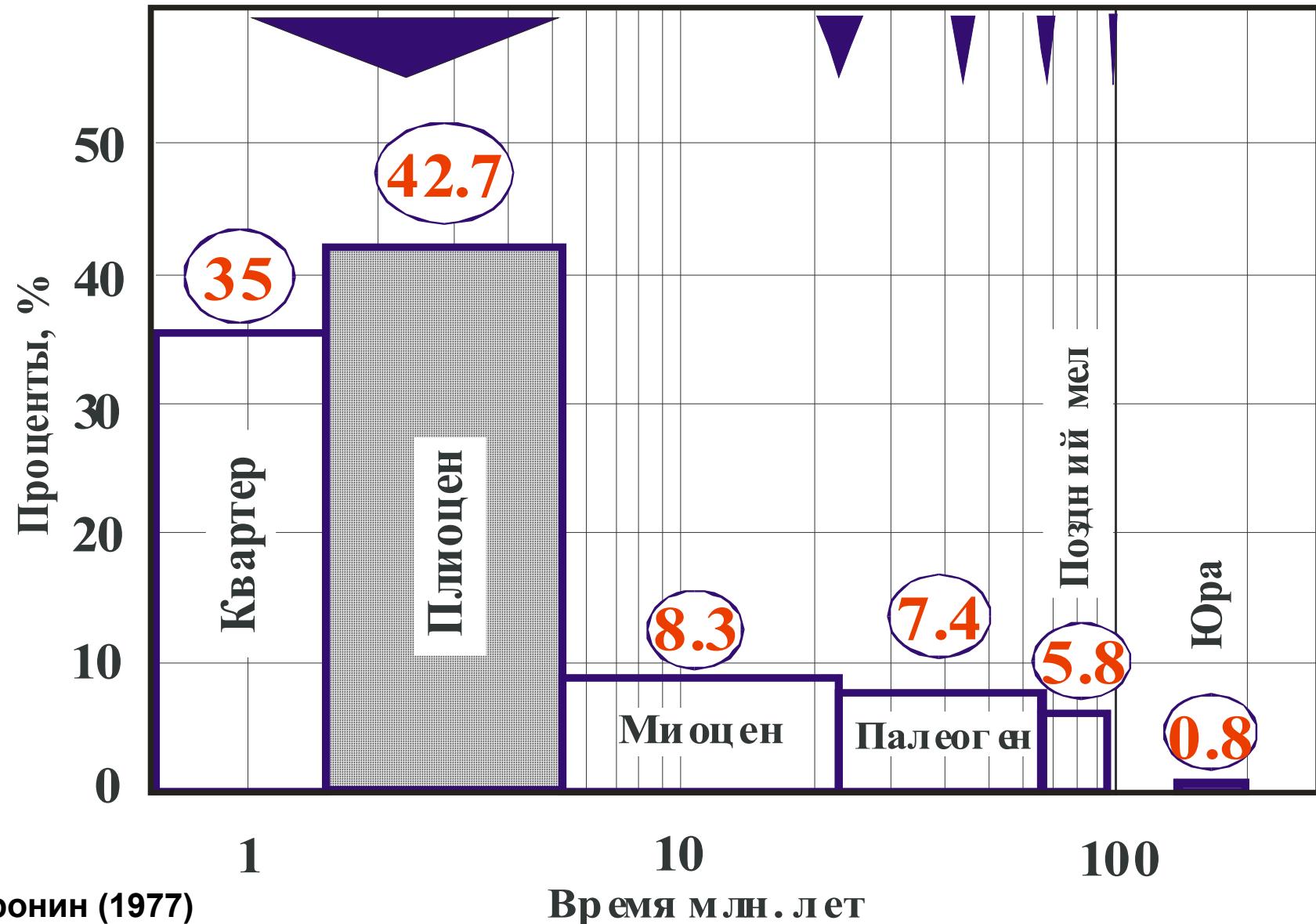
Осадочный чехол и вулканическое основание дна Канарской котловины в Атлантическом океане

Подводные горы

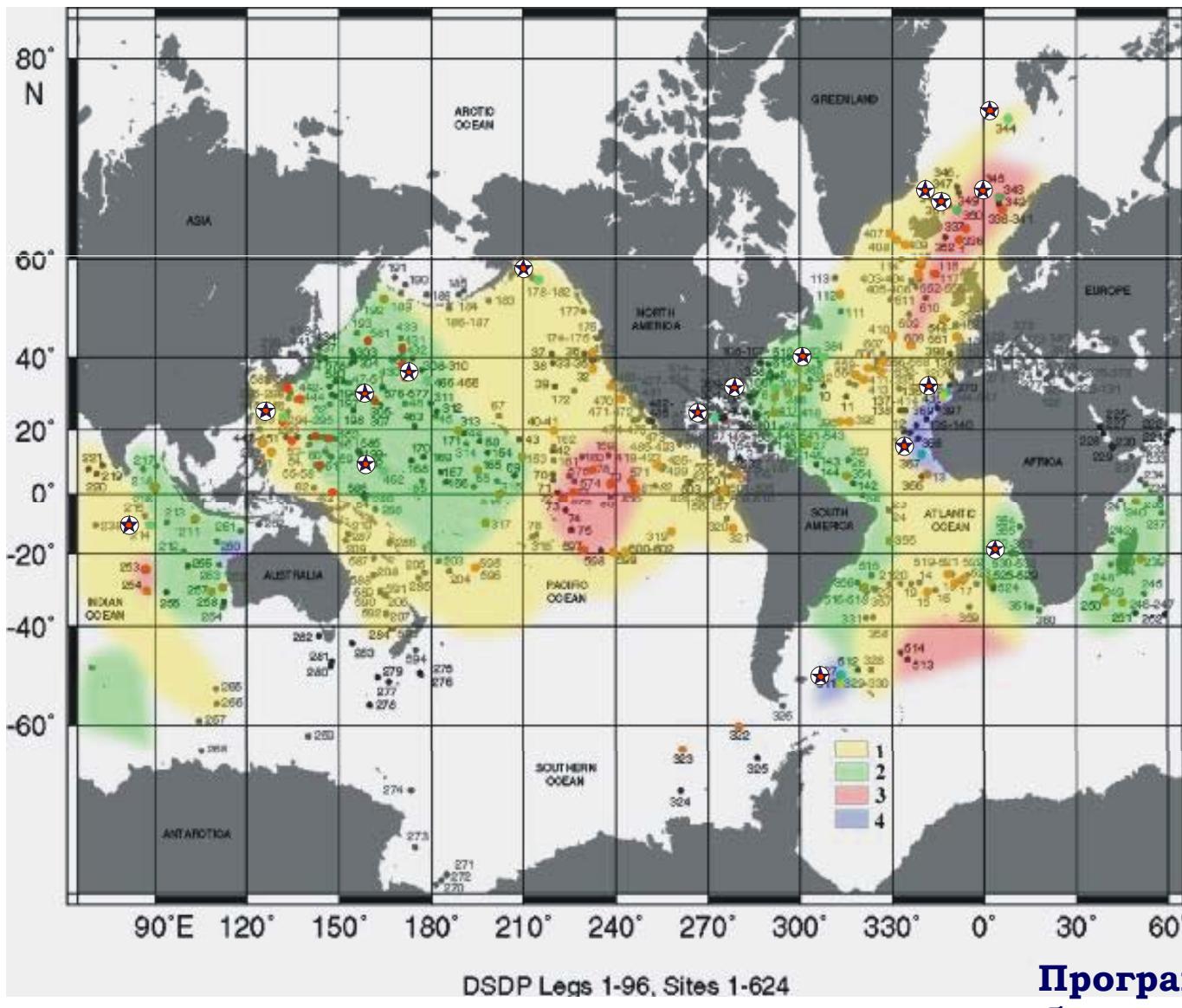


Возраст базальтов II слоя океанической коры

Интервалы времени и кометных бомбардировок



Максимальный возраст осадков I слоя океанической коры



**Звездочки-наличие
в породах остатков
наземных растений:
пыльца, семена,
листья, древесина,
уголь**

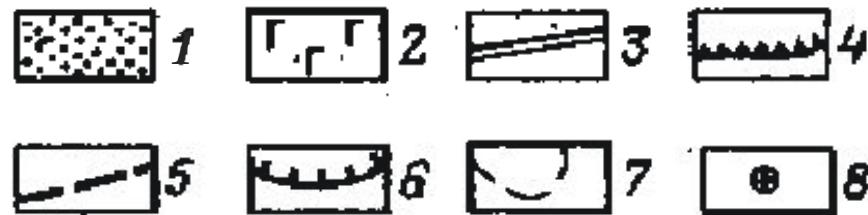
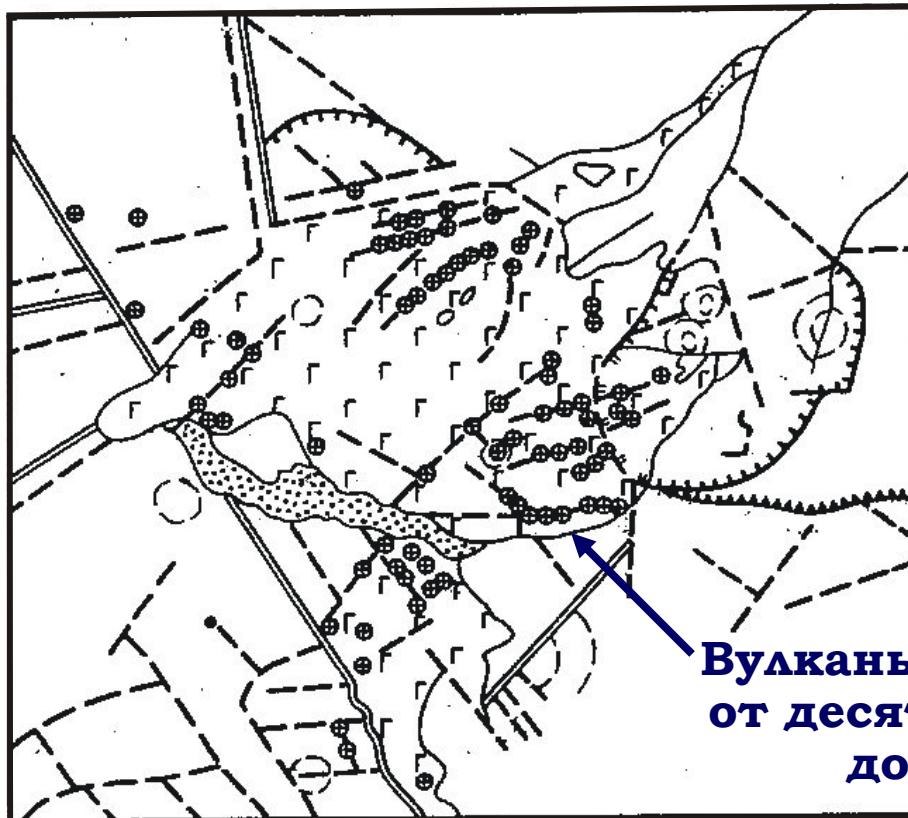
- 1 – квартер-неоген
 - 2 – палеоген
 - 3 – мел
 - 4 – юра-триас

Программы глубоководного бурения DSDP (1968-1984) и ODP (1985-2003)

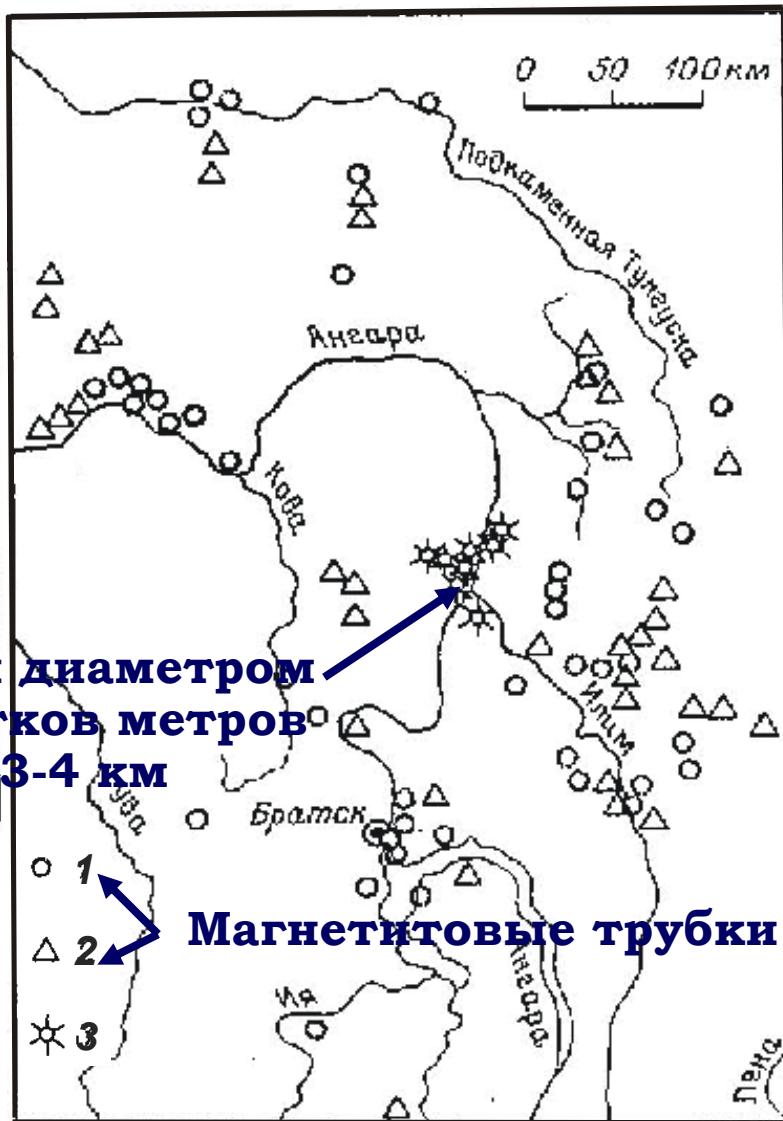
Диатремовые поля над астеносферными линзами

Плато Дариганга в Монголии,
базальты плиоценового возраста

Ангаро-Илимский железорудный
район, триасовый магматизм



Баренбаум (2013) [Каминский, 1984]

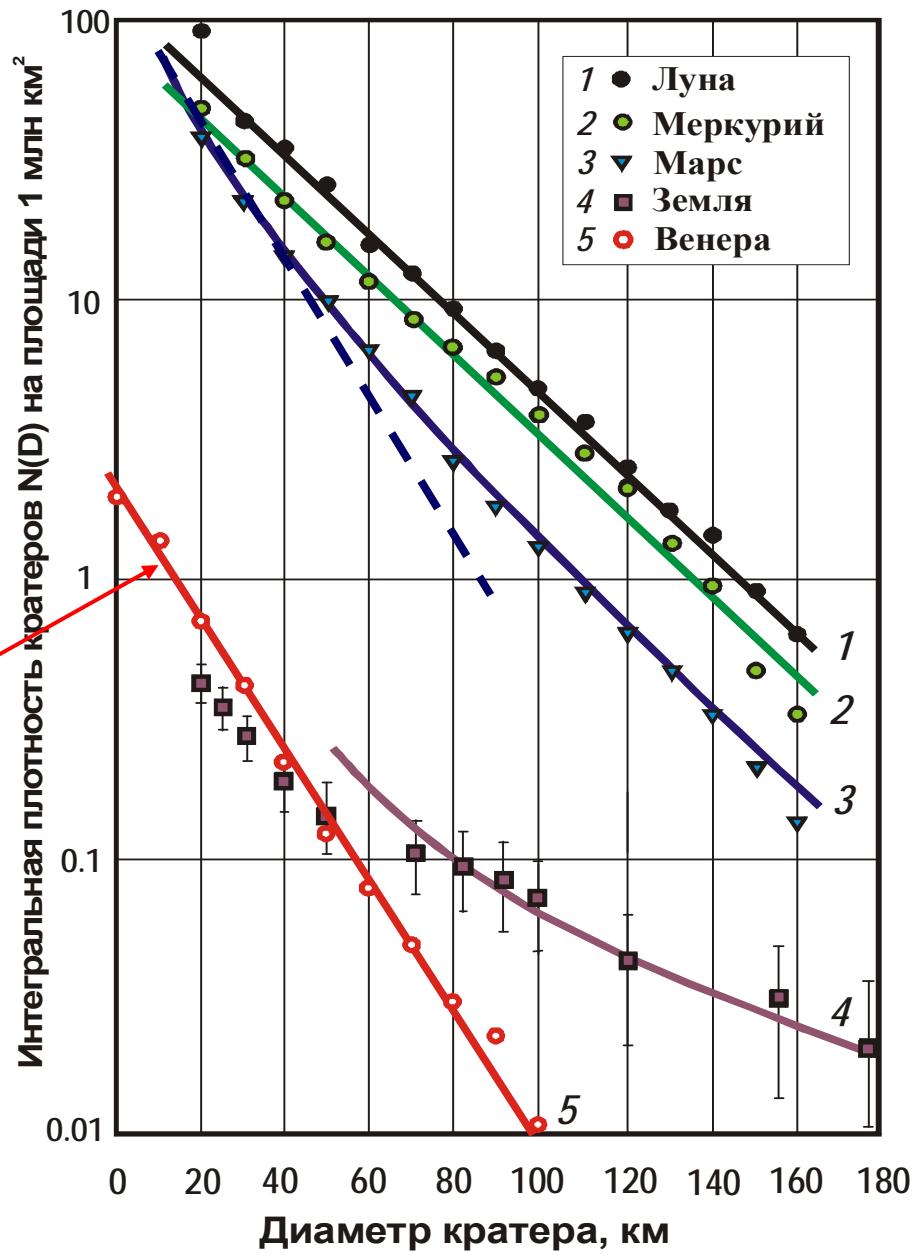


[Страхов, 1978]

ВЕНЕРА

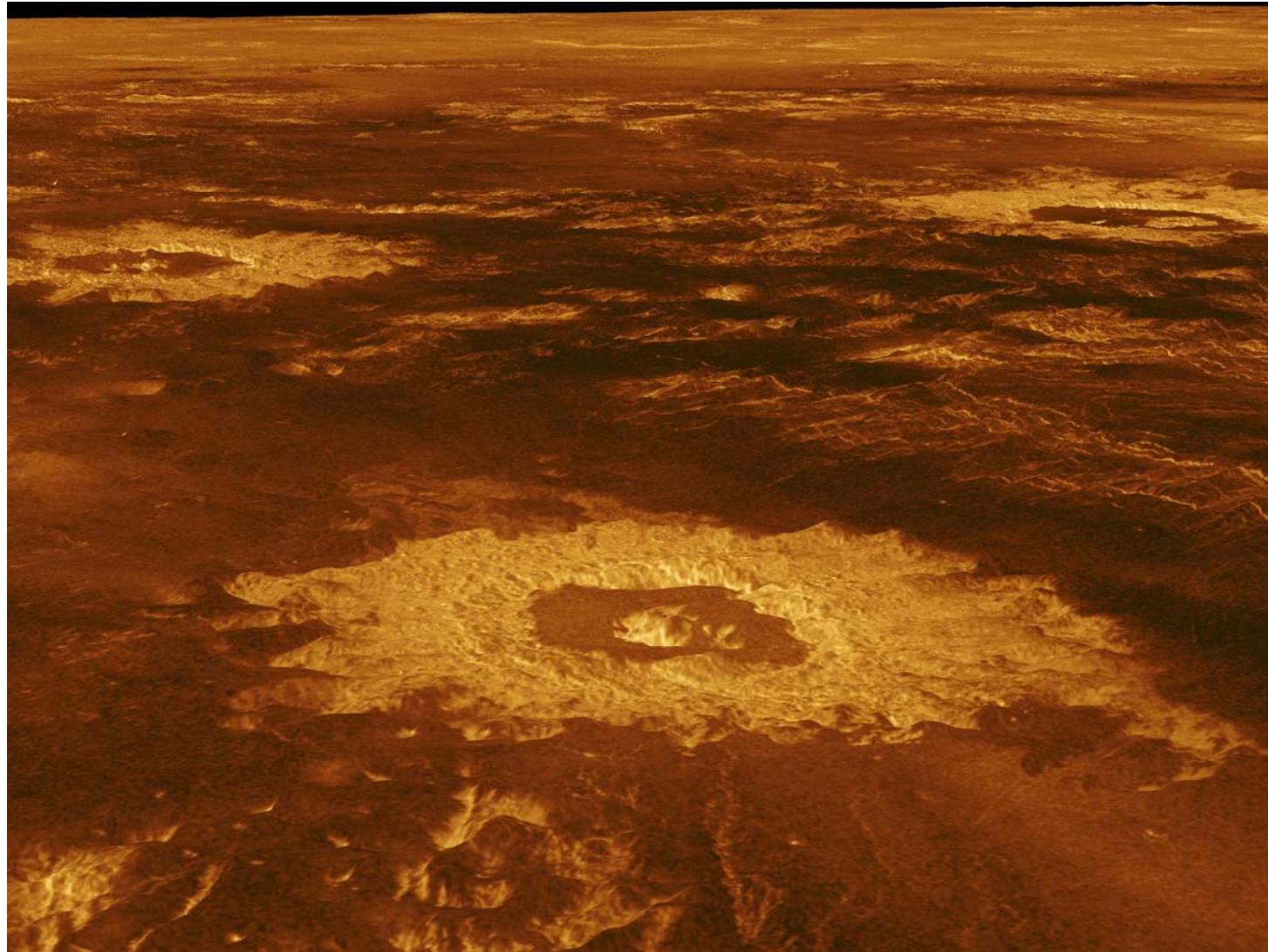
Атмосфера в 93 раз плотнее, чем на Земле
Температура поверхности 475 С:

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



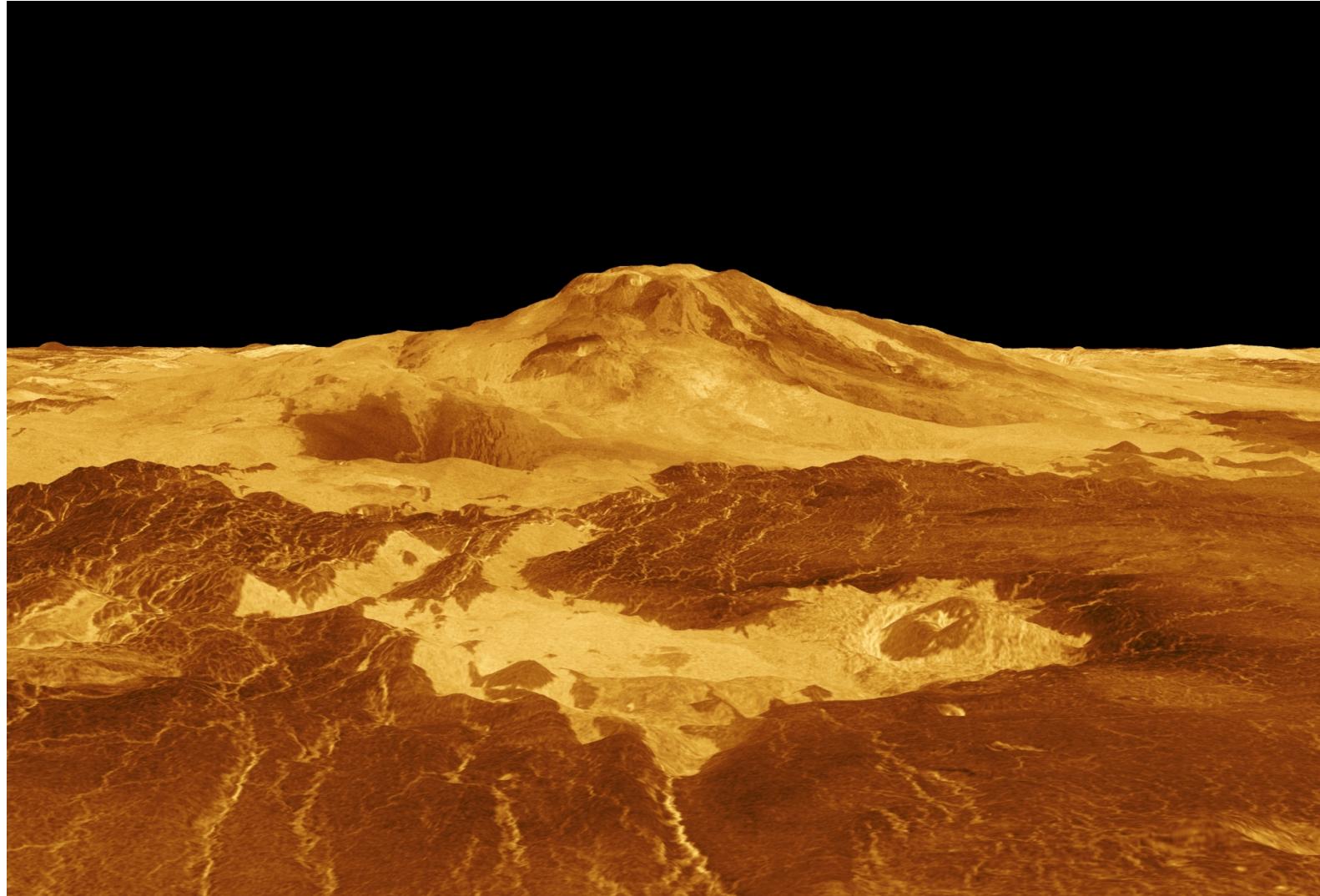
диатремы

Кратеры на Венере



Диатремы
Одиночные эффекты

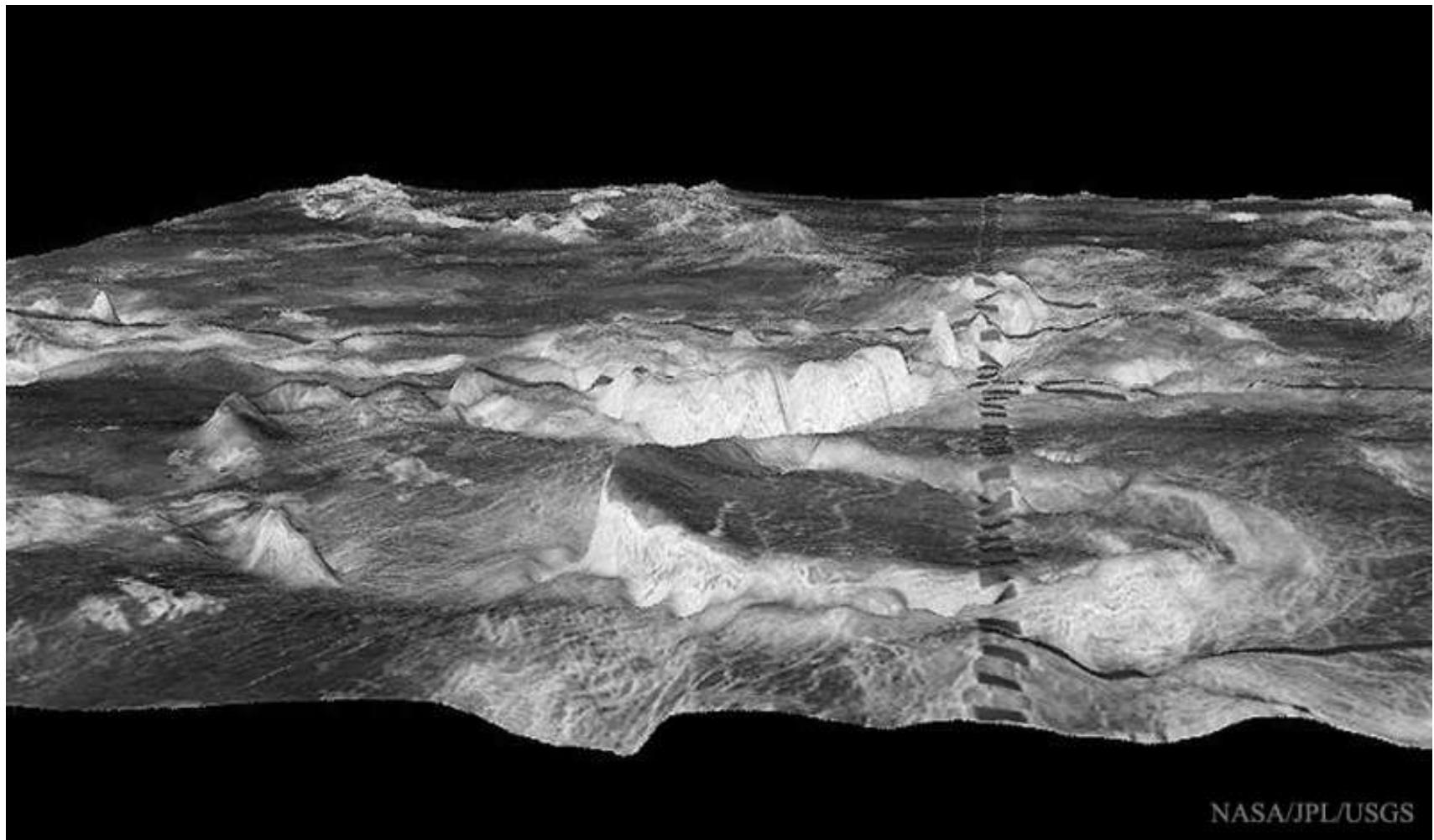
Монсы на Венере



Гора Маат (Maat Mons) высотой 8 км

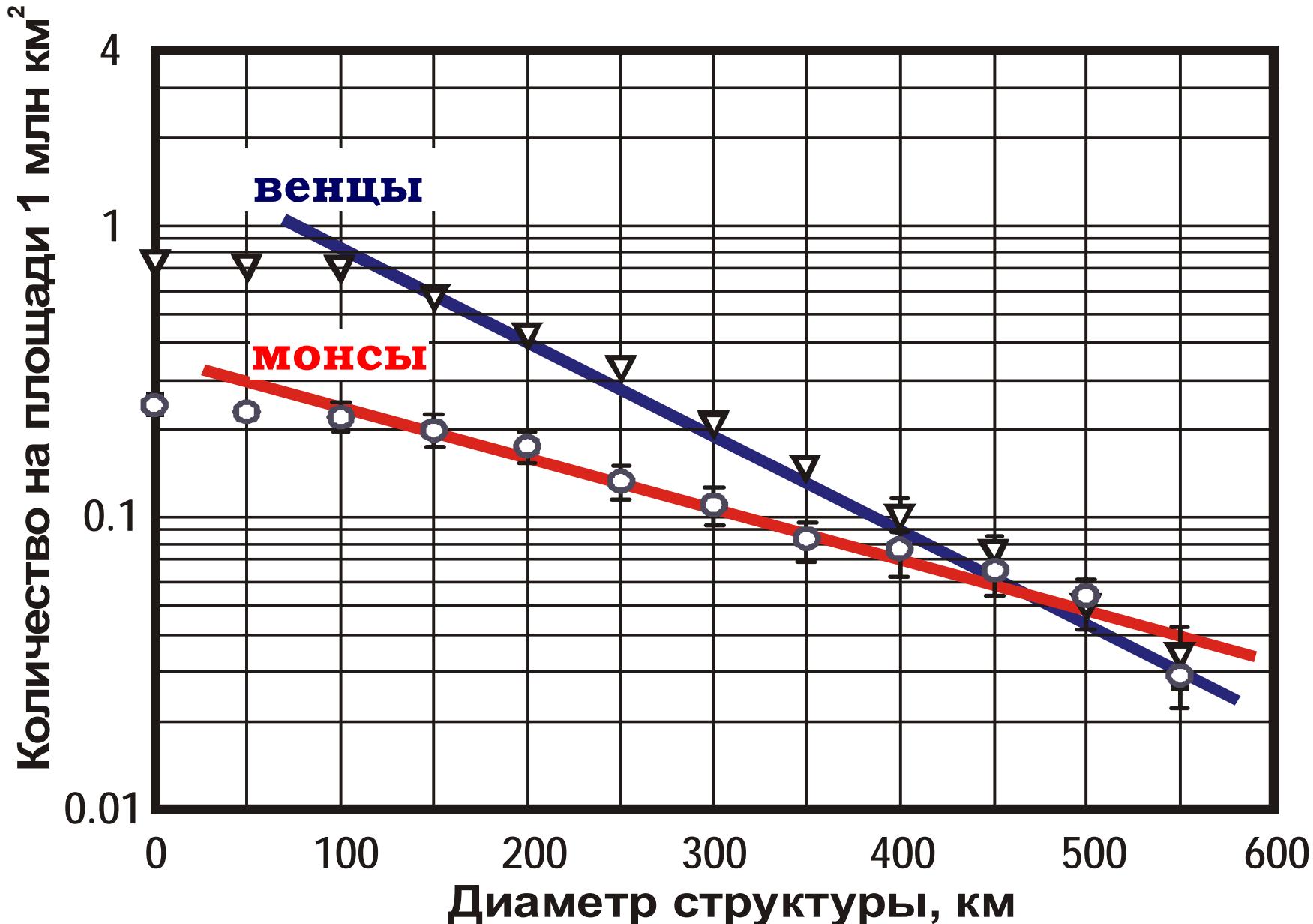
Коллективный эффект

Венцы на Венере



**Цилиндрическая корона Атете диаметром в 500 км
Коллективный эффект**

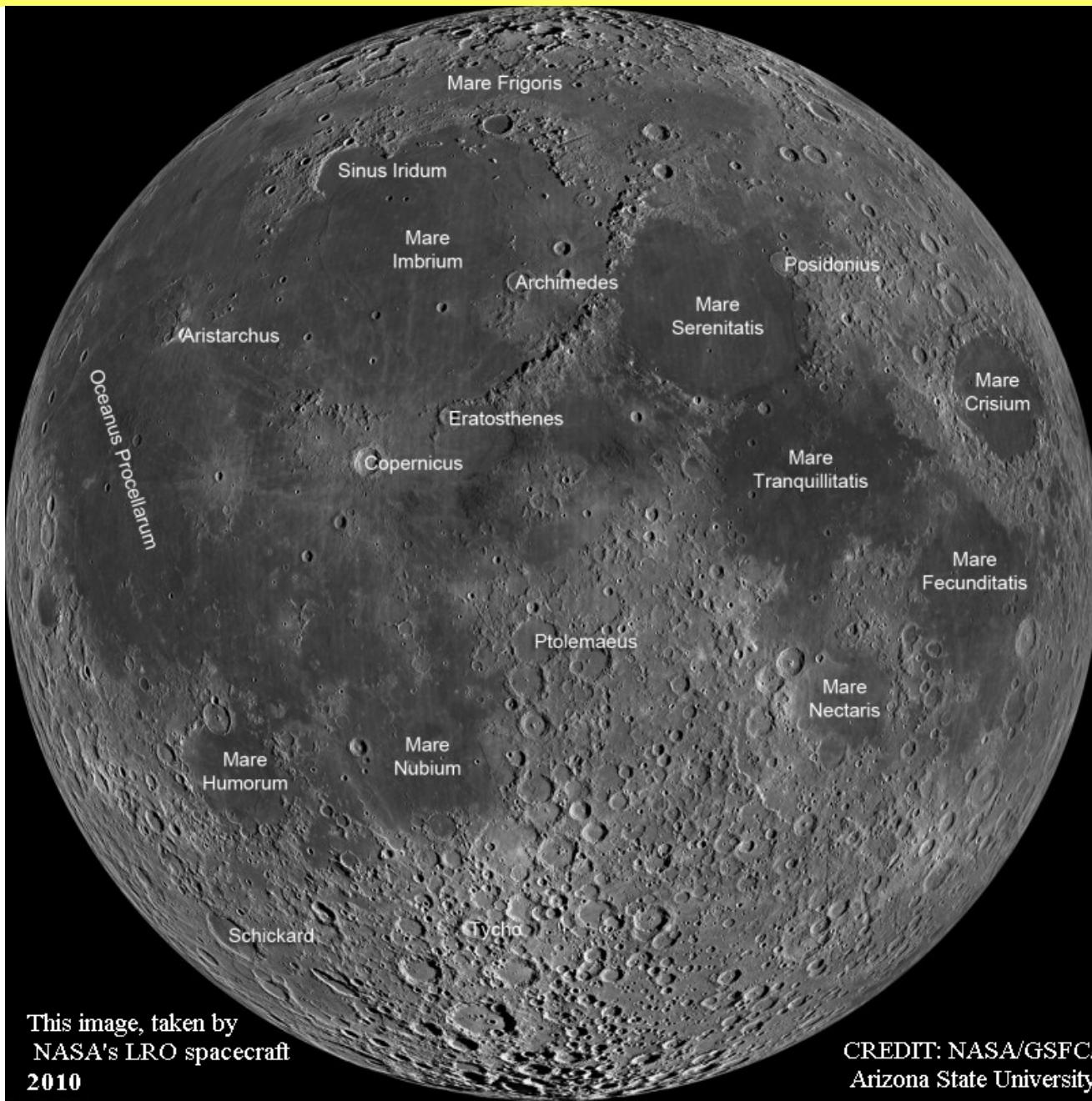
Интегральная плотность венцов и монсов на Венере



ЛУНА

Кратеры, моря, масконы

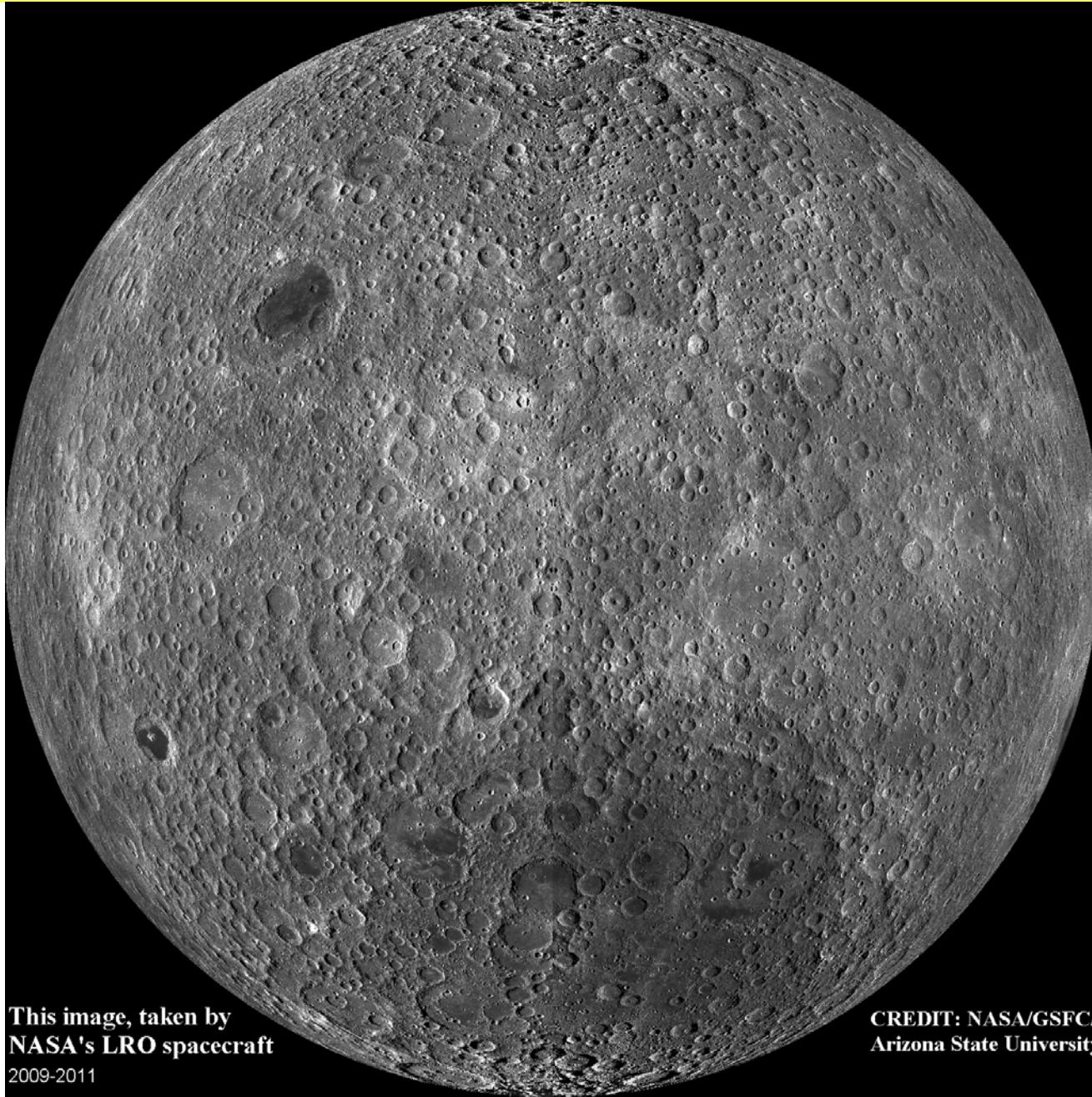
Видимая сторона Луны



This image, taken by
NASA's LRO spacecraft
2010

CREDIT: NASA/GSFC/
Arizona State University

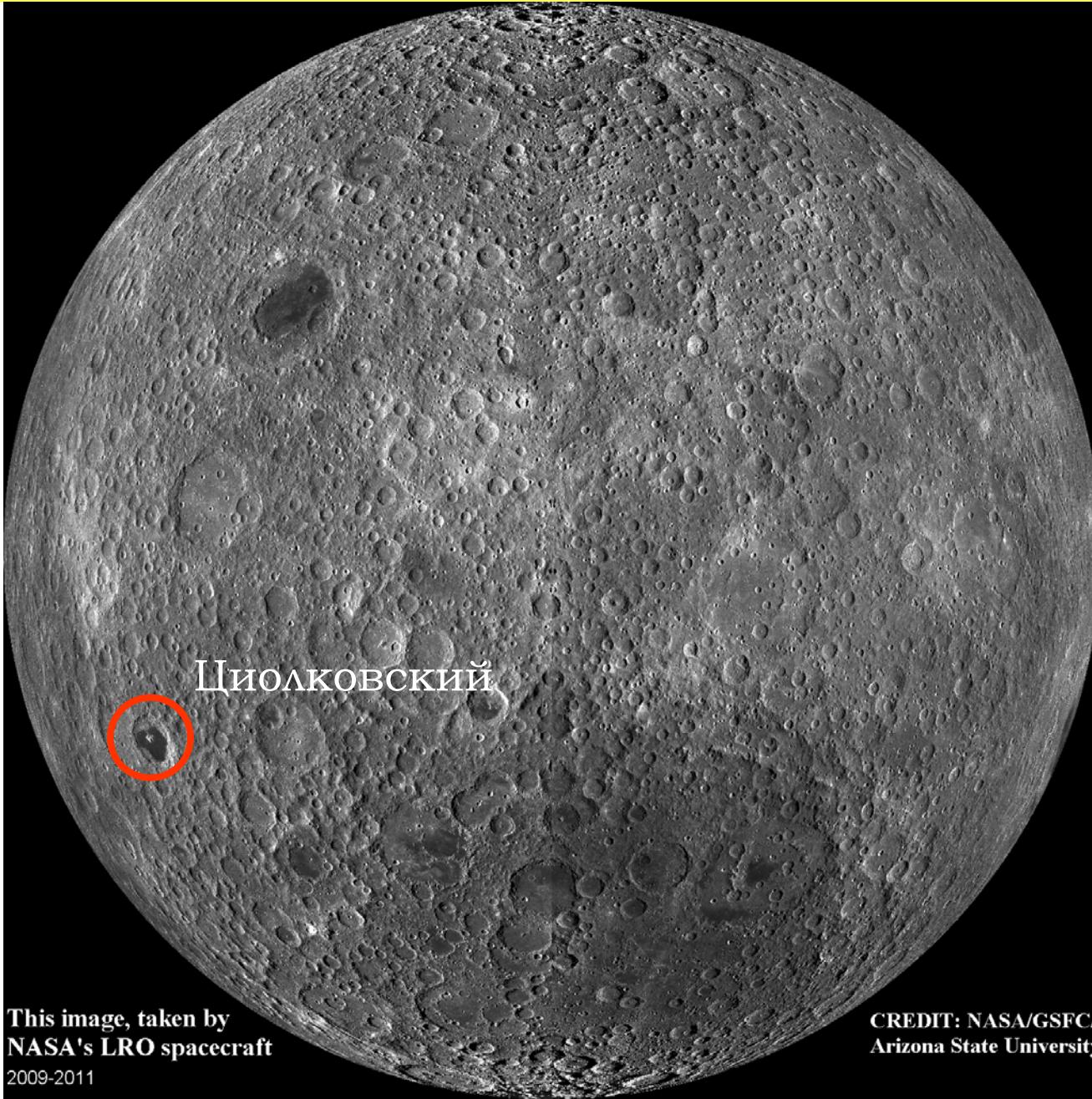
Обратная сторона Луны



This image, taken by
NASA's LRO spacecraft
2009-2011

CREDIT: NASA/GSFC/
Arizona State University

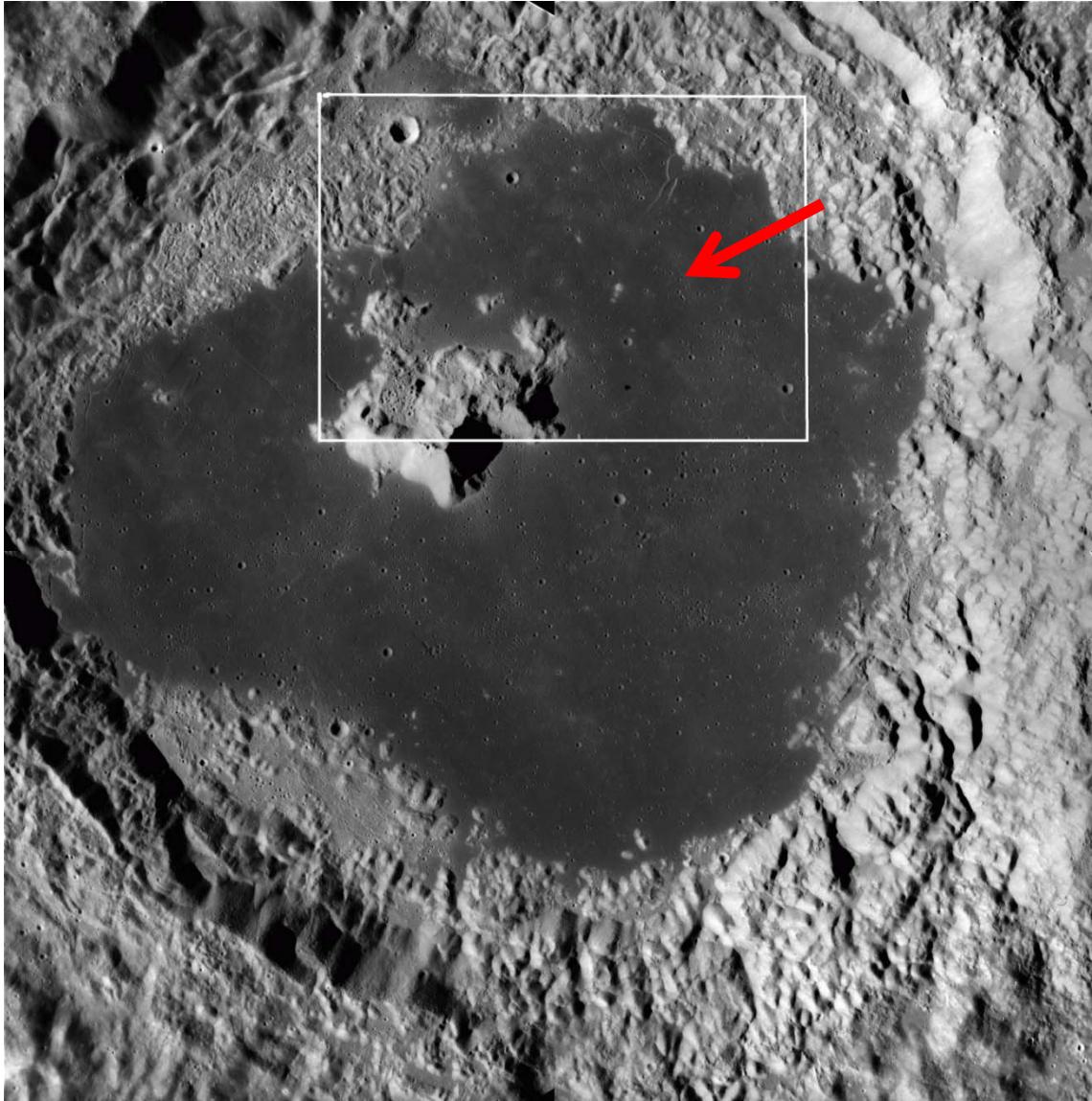
Обратная сторона Луны



This image, taken by
NASA's LRO spacecraft
2009-2011

CREDIT: NASA/GSFC/
Arizona State University

Кратер Циолковский на обратной стороне Луны



D = 184 км

T ~1 млн. лет

Плюмовое поднятие и вулкан на днище кратера

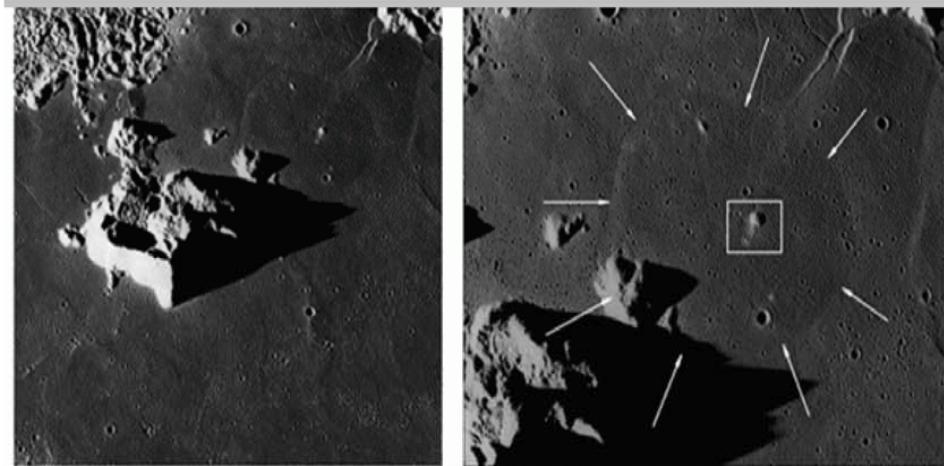


Table 1. Characteristics of the plume and the volcano at the Tsiolkovsky crater bottom

Plume

Diameter	24 – 26 km
Longitude of center	129 33 E
Latitude of center	-19 27 S
Distance from central peak	32 km

Volcano

Longitude	129 52 E
Latitude	-19 30 S
Base diameter	1760 m
Cone height	102 m
Throat diameter	50-70 m
Cone inclination	7-8 degrees
Material ejection	2 x 1 km
Distance from central peak	36 km

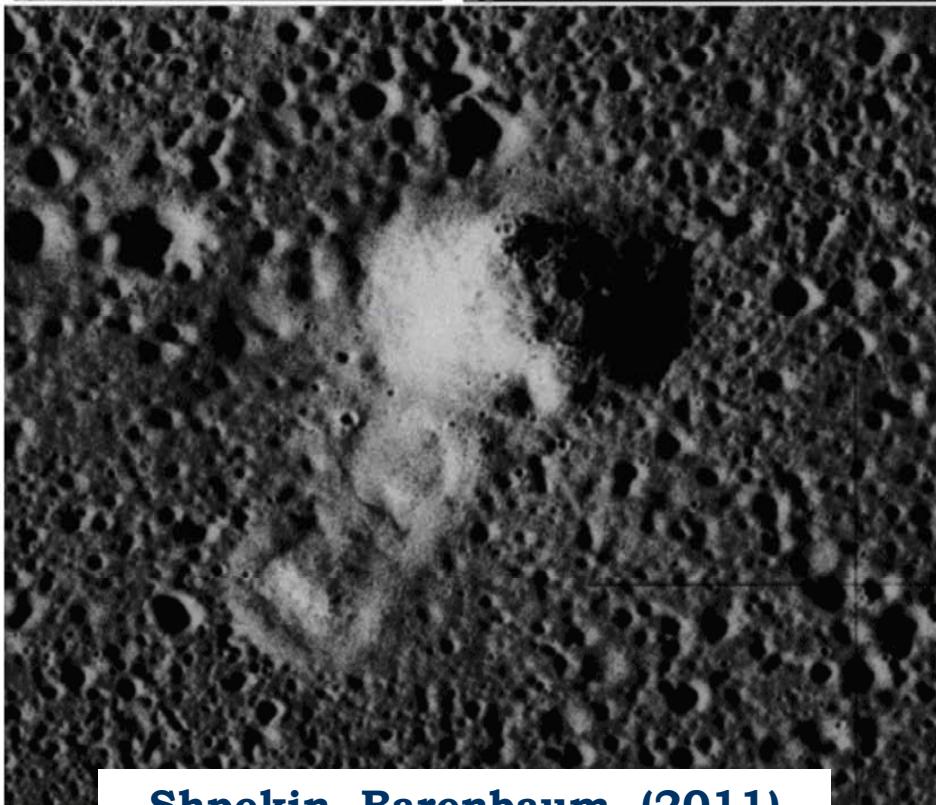
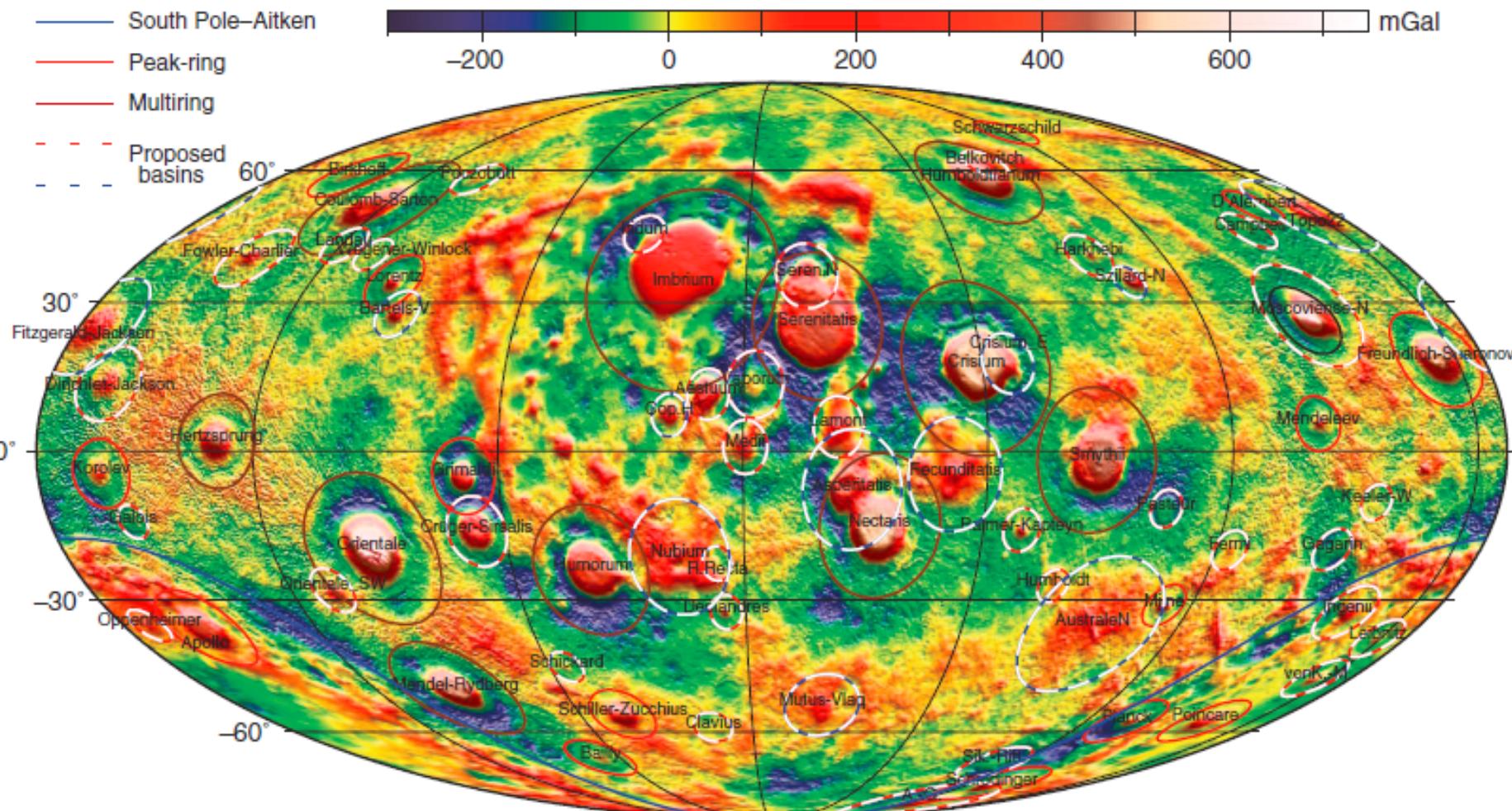


Fig.2 Above left: central part of Tsiolkovsky crater bottom
Above right: studied site to the East from central peak

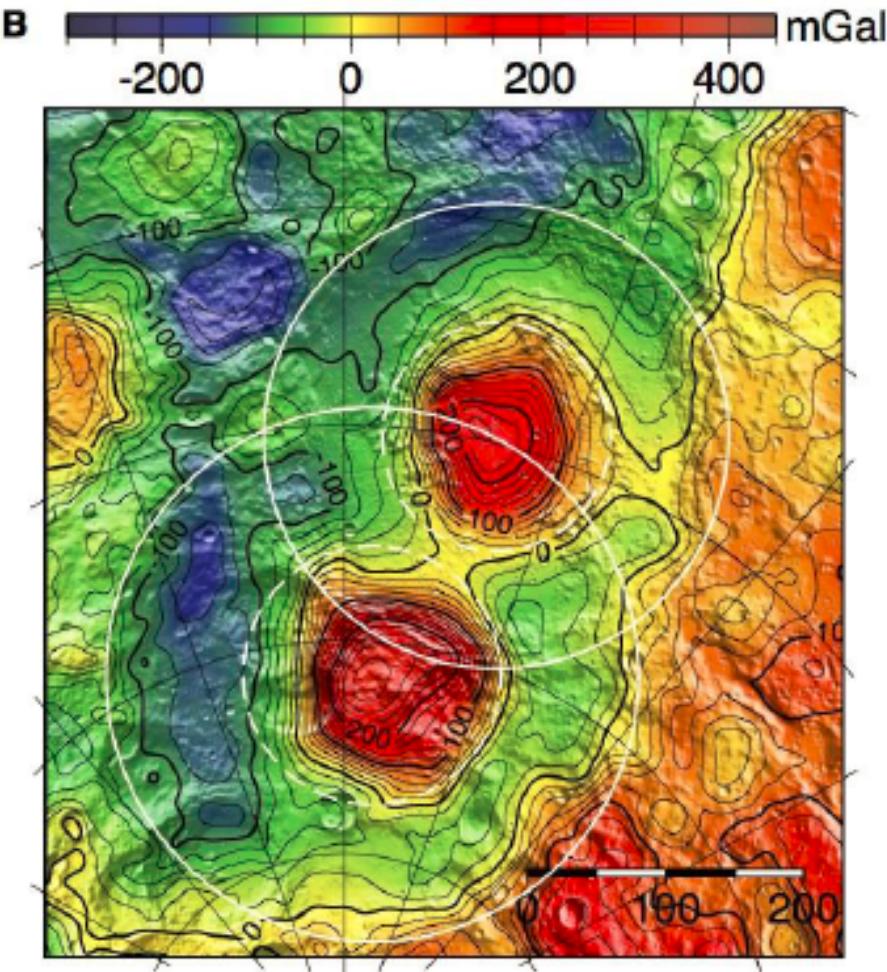
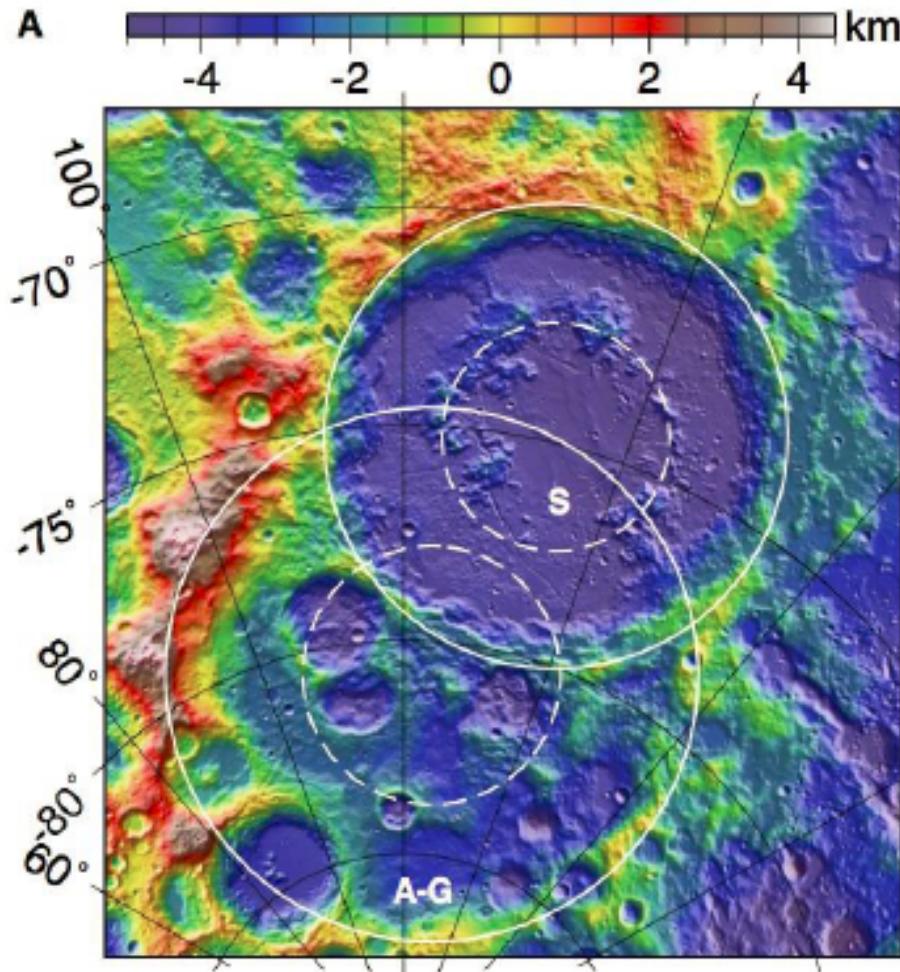
Fig.3 Below: Volcano and its vicinity in the rays of sunset
This territory is noted by white rectangular on Fig.2

Масконы: гравитационные аномалии Буге на карте Луны



Красно-белые кружки – бассейны с одним топографическим кольцом и без пика.
Сине-белые кружки – бассейны без четкого топографического обода или гребня

«Молодые» бассейны с аномалиями Буге



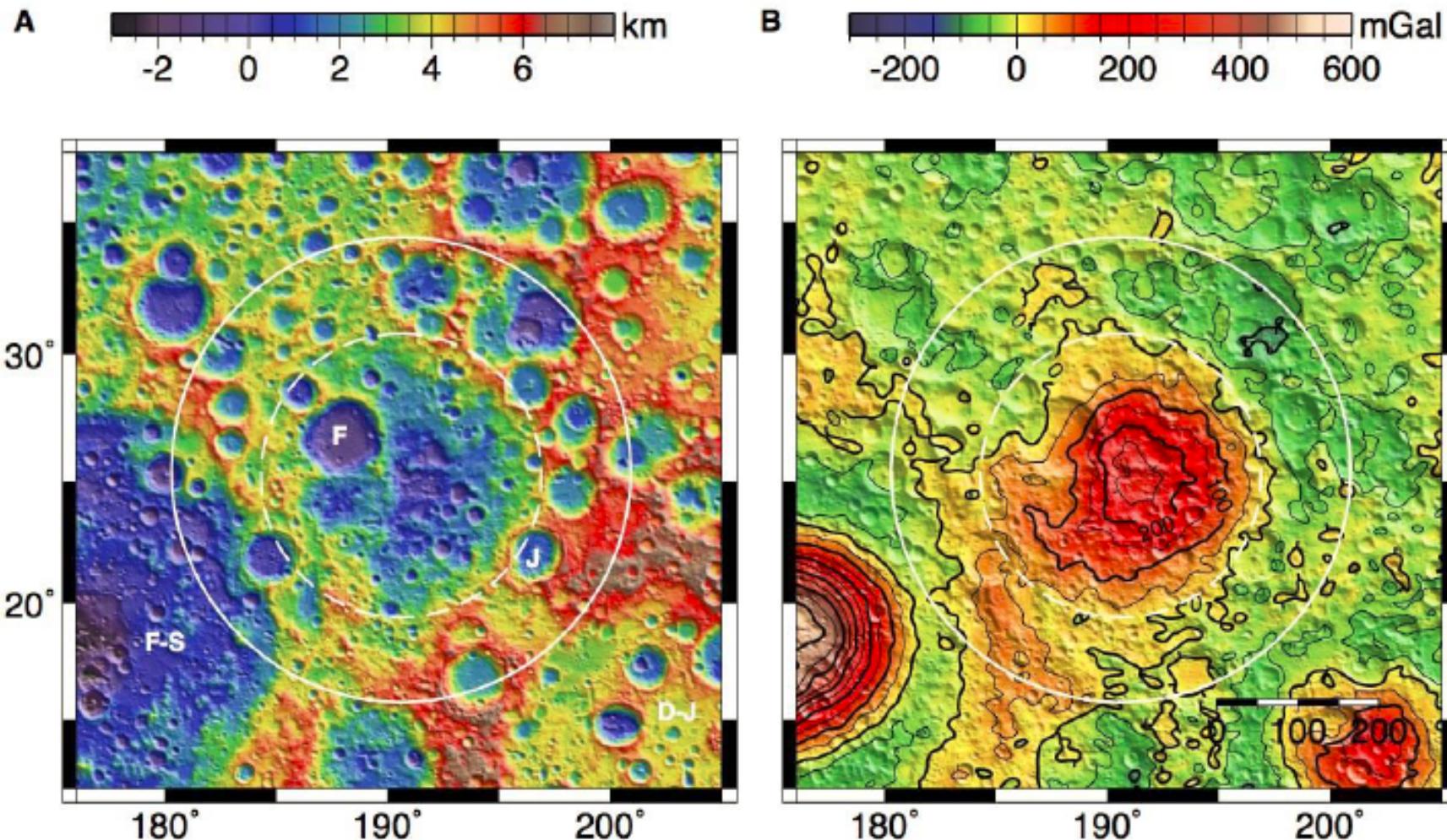
Бассейн Шредингер (S) - 326 км

Бассейн Амундсен-Гансвиндт (A-G) - 377 км

Коллективные эффекты

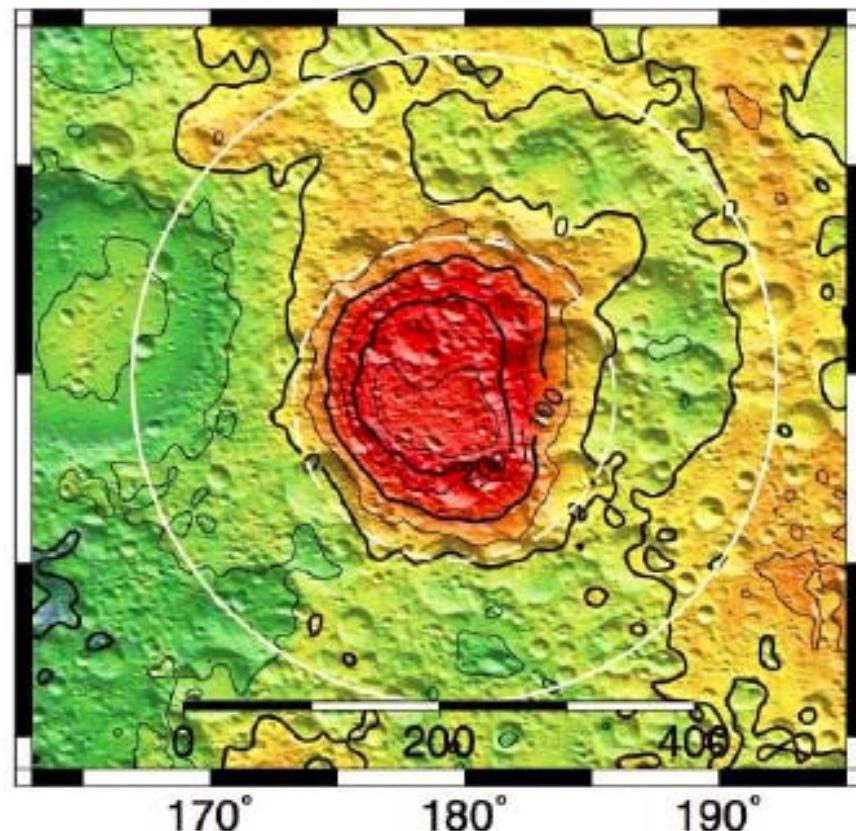
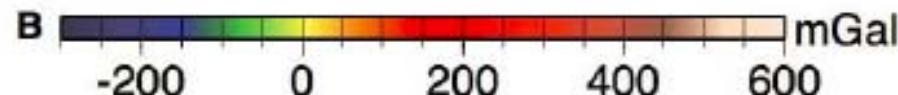
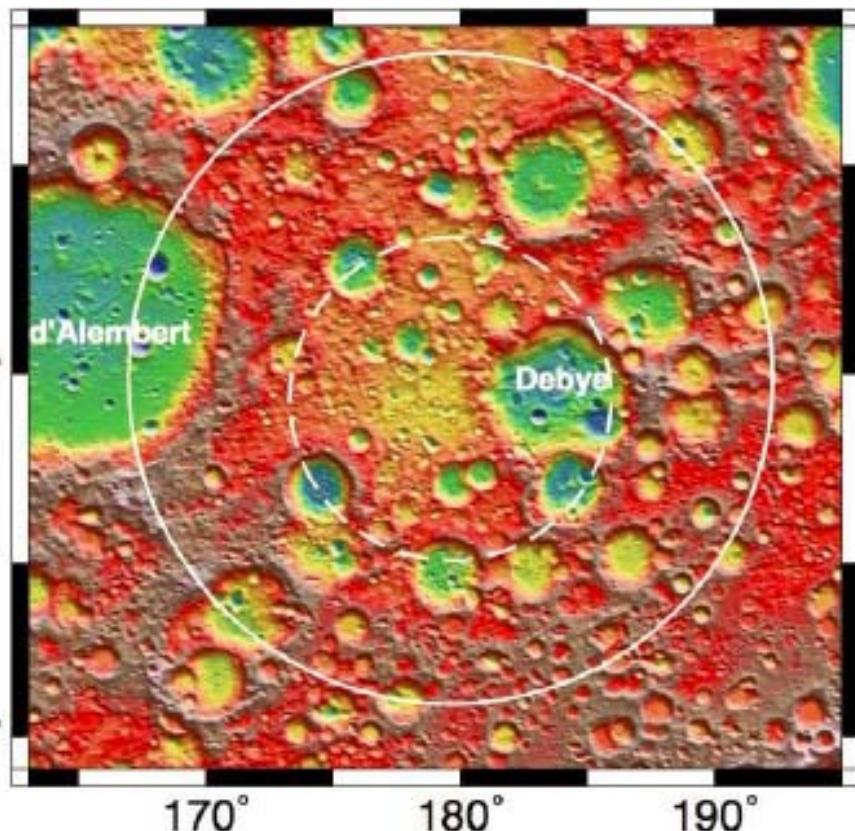
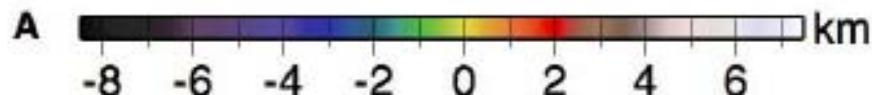
Neumann et al. (2015)

«Старые» бассейны с гравитационными аномалиями Буге



Кратеры: Фитцджеральд (F), Джексон (J) и Фрейндлих-Шаронов (F-S).

Аномалии Буге, не связанные с кратерами

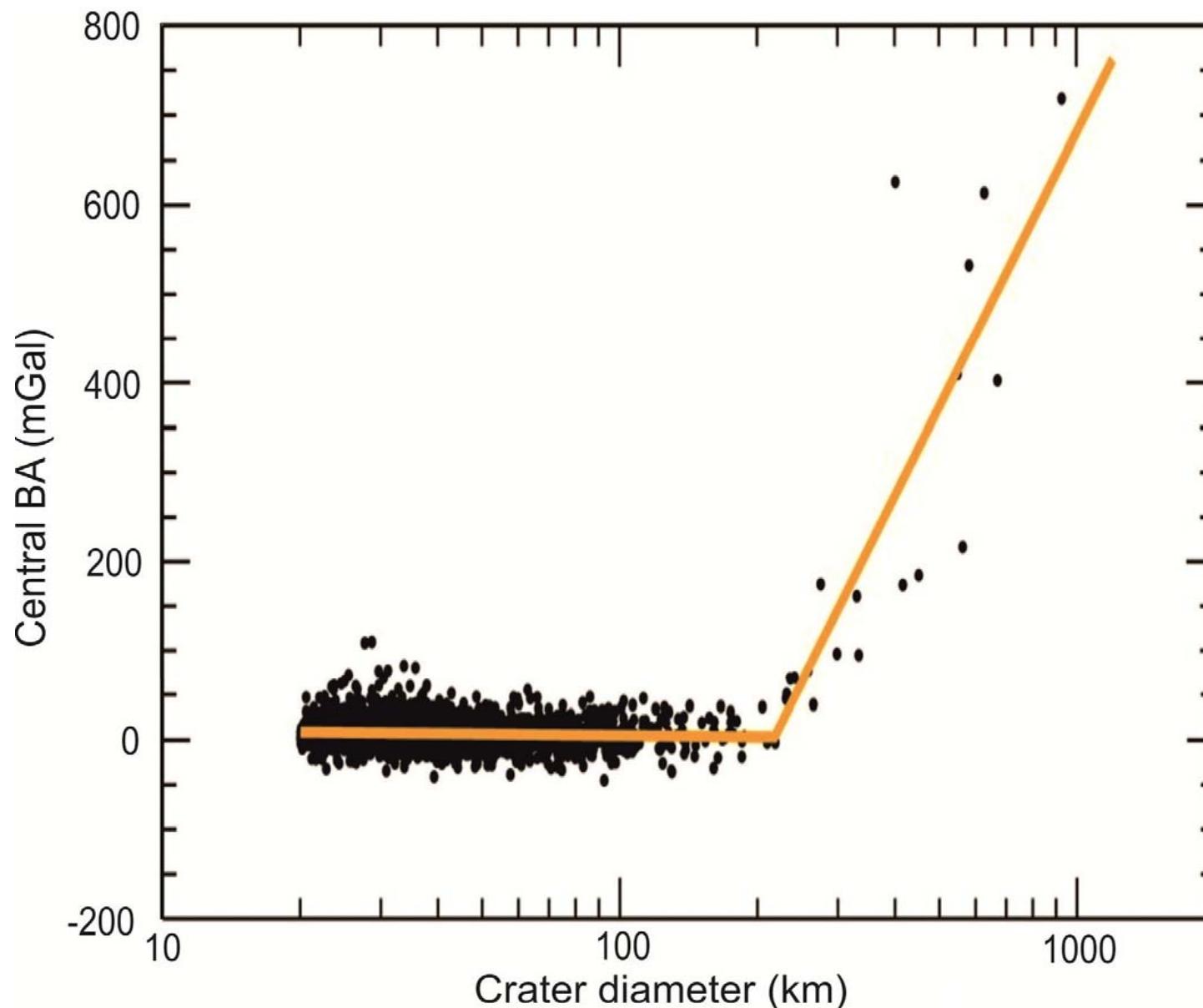


Кратеры: Альберт и Дебуе

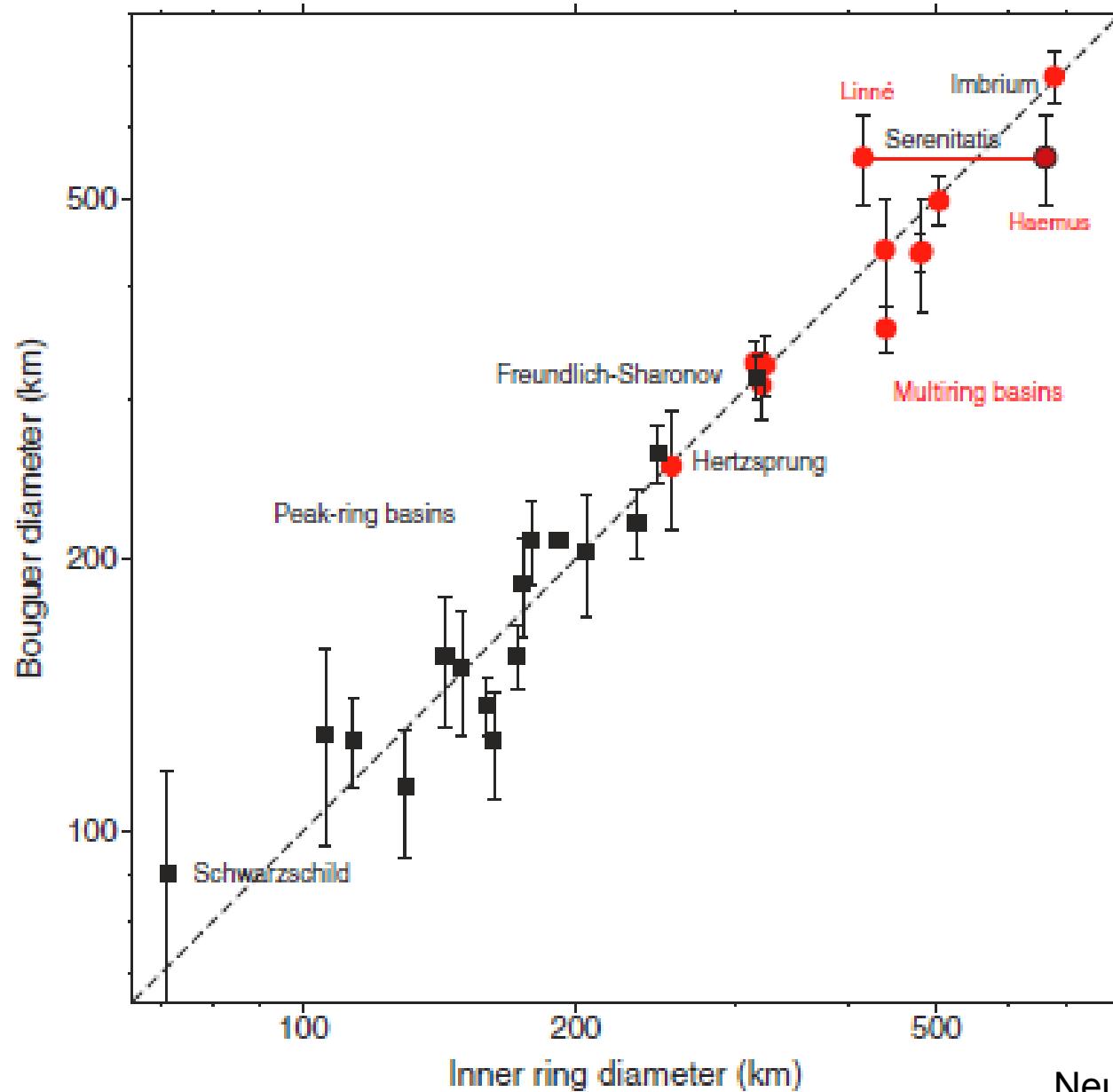
Коллективные эффекты

Neumann et al. (2015)

Зависимость амплитуды аномалии от диаметра структуры

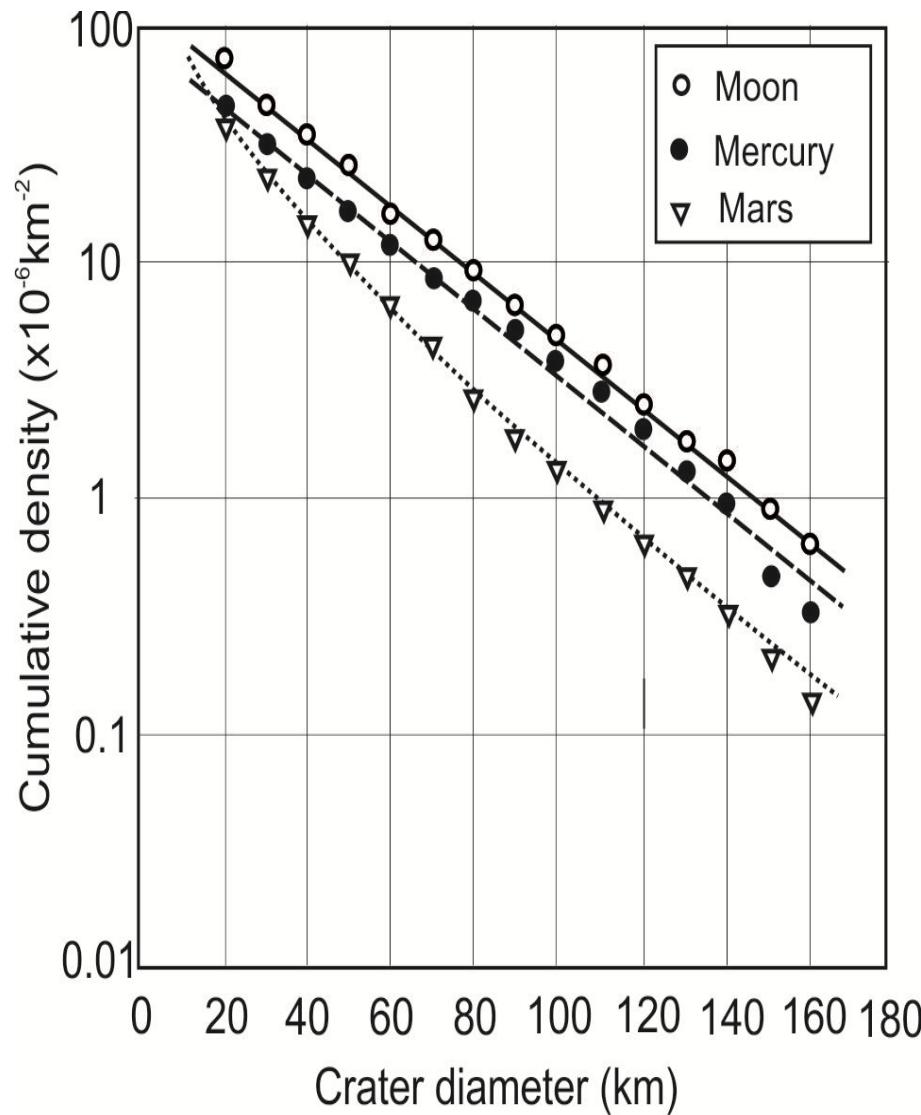


Связь диаметра аномалии Буге с диаметром бассейна

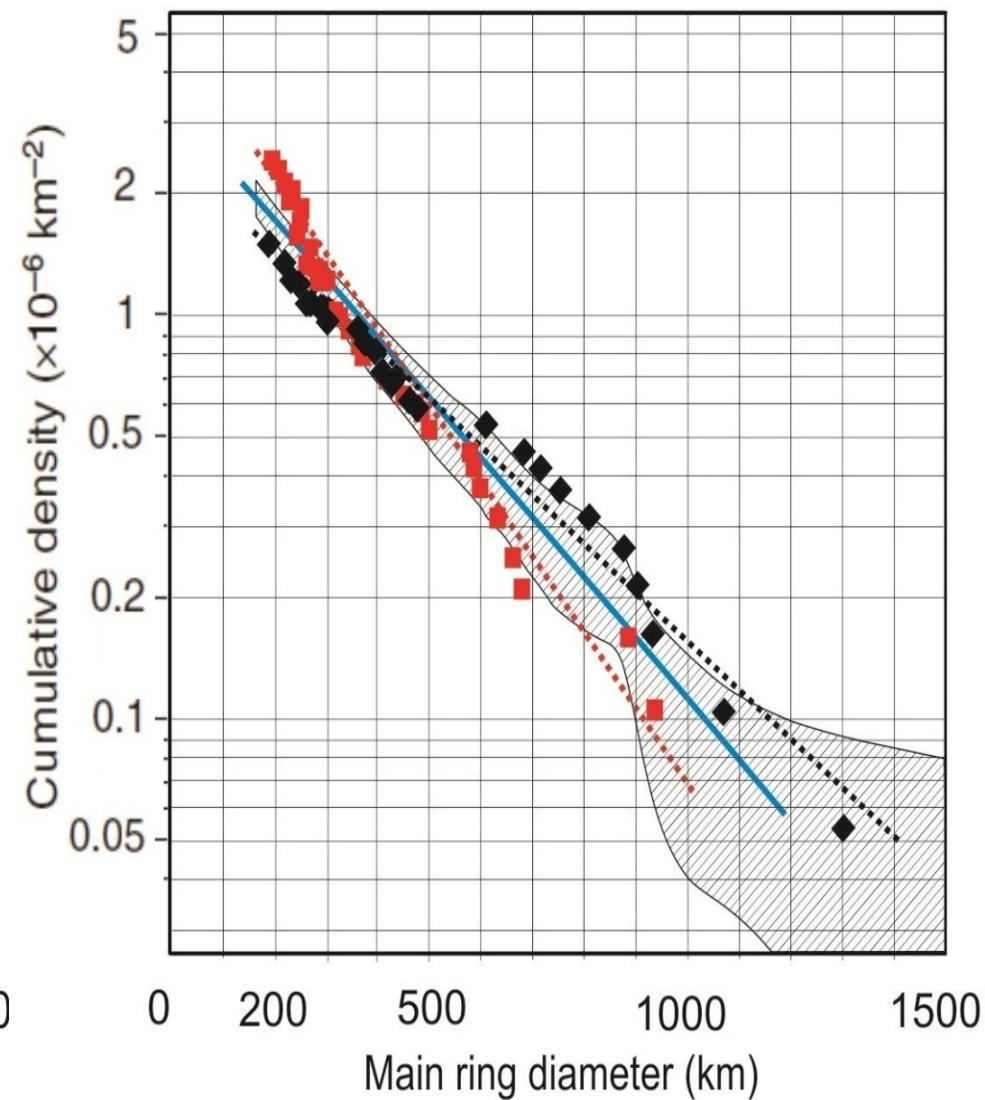


Распределение кратеров и масконовых морей по размерам

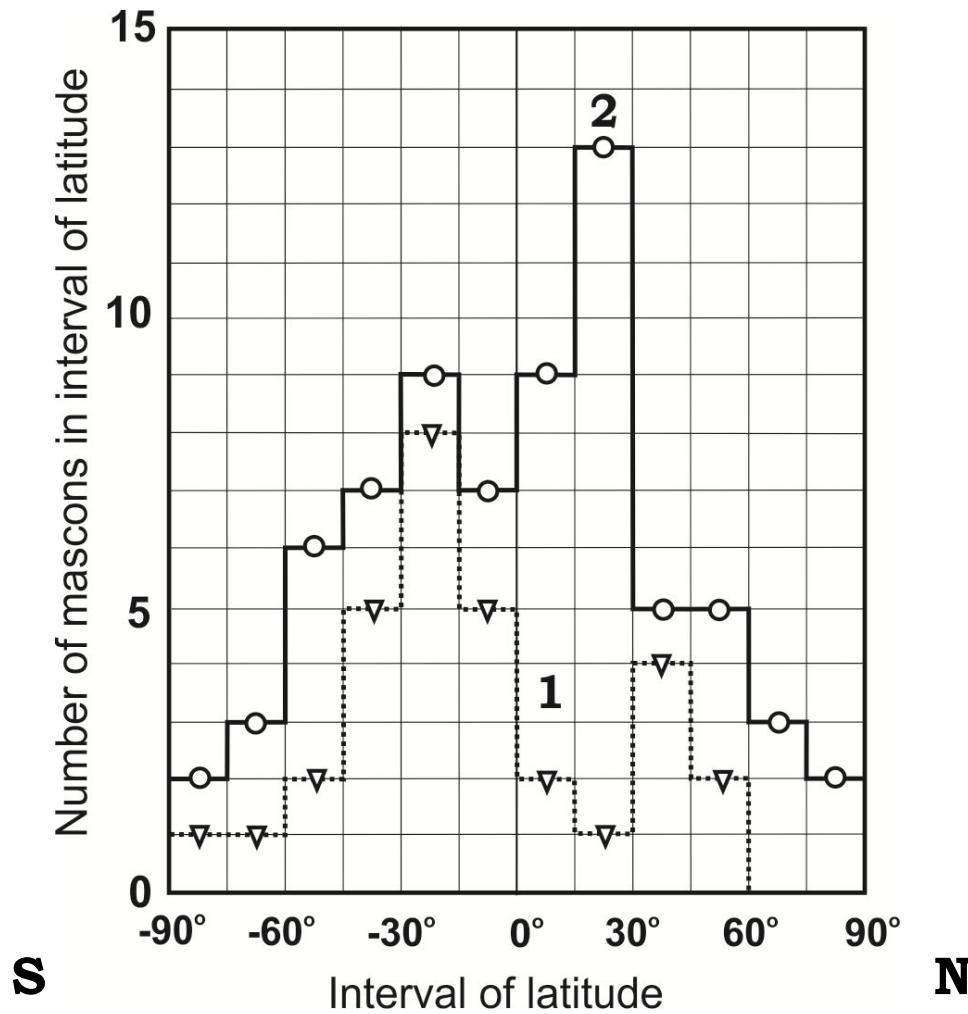
Кратеры на континентах



Бассейны с масконами



Распределение масконов Луны по широтам



1. Масконы молодого возраста

2. Старые масконы, не поддающиеся классификации

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !