

Баренбаум А.А. (ИПНГ РАН, Москва)

**БОМБАРДИРОВКИ ЗЕМЛИ
ГАЛАКТИЧЕСКИМИ КОМЕТАМИ КАК
ПРИЧИНА СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ
ЦИКЛИЧНОСТИ: НОВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФЕНОМЕНА
«ИСТИННОГО ПОЛЯРНОГО БЛУЖДЕНИЯ»**

ЗНЧ-2023. Снежинск 29.05.2023

Баренбаум А.А. (ИПНГ РАН, Москва)

**БОМБАРДИРОВКИ ЗЕМЛИ
ГАЛАКТИЧЕСКИМИ КОМЕТАМИ КАК
ПРИЧИНА СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ
ЦИКЛИЧНОСТИ: НОВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФЕНОМЕНА
«ИСТИННОГО ПОЛЯРНОГО БЛУЖДЕНИЯ»**

План сообщения

- 1. Галактическая модель геологической цикличности**
- 2. Кометный механизм суперконтинентальной цикличности**
- 3. Феномен «истинного полярного блуждания»**
- 4. Влияние силы Кориолиса на движение литосферных плит**
- 5. Модель вращающейся литосферной оболочки**

ЗНЧ-2023. Снежинск 29.05.2023

Галактическая модель геологической цикличности

Разрабатывается более 40 лет

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»

$$\Delta t = 1 - 5 \text{ млн лет}$$

$$T = 20 - 37 \text{ млн лет}$$

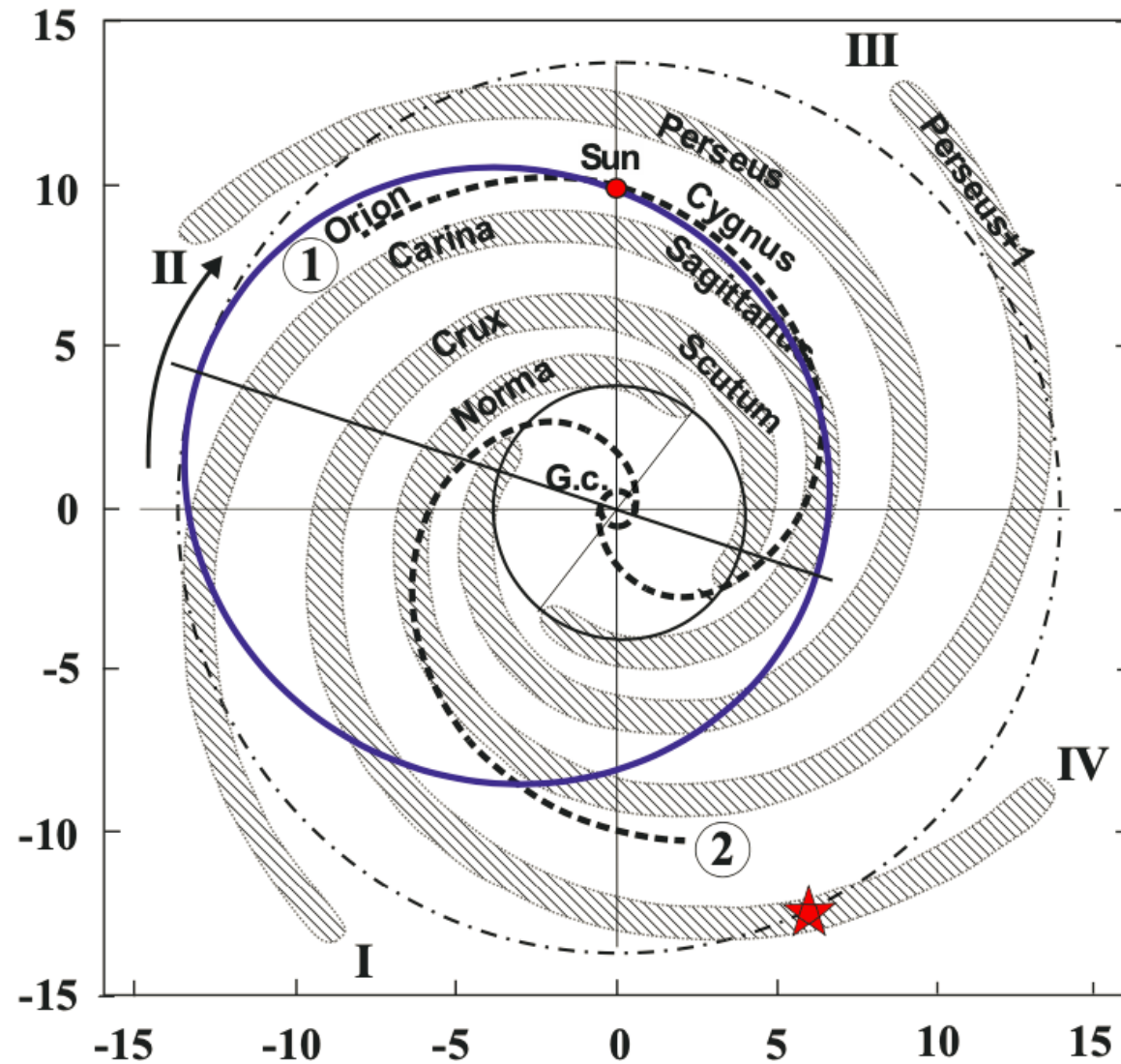
$$N = 10^5 - 10^7 \text{ комет}$$

За 1 бомбардировку на Землю поступает

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

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

Галактическая модель (5)



I – IV – галактические рукава

1 и 2 – струйные потоки

Эллипс – орбита Солнца

Штрихпунктирный круг –
радиус коротации Галактики

Звездочка – место рождения
Солнечной системы в рукаве IV

Стрелкой указано направление
движения Солнца по орбите, а
также вращения Галактики

ЗОНОТЕМА (ЗОН)	ЭРАТЕМА (ЭРА)	СИСТЕМА (ПЕРИОД)	ОТДЕЛ (ЭПОХА) (ДЛЯ ЧЕТВЕРТИЧНОЙ СИСТЕМЫ - РАЗДЕЛ)		Я Р У С (В Е К)		ИНДЕКС ЯРКА	КОМПЛЕКТ ПОДРАЗДЕЛОВ	
			0,01	0,8					
кайм.-зоноса		ЧЕТВЕРТИЧНАЯ Q (АНТРОПЕГЕНОВЫЙ) 1,6 <i>Денуае, 1829 г.</i>	5,1	3,5	Общепринятых ярусов нет				
КАМБРИЙСКАЯ KZ	65	НЕОГЕНОВАЯ N (НЕОГЕНОВЫЙ) 23,0 <i>Хорне, 1853 г. (был верхний отдел третичной системы)</i>	5,1	19,5					
		ПАЛЕОГЕНОВАЯ P (ПАЛЕОГЕНОВЫЙ) 40,4 <i>К. Науманн, 1866 г. (был нижний отдел третичной системы)</i>	38	16,9					
		МЕЛОВАЯ K (МЕЛОВОЙ) 79,0 <i>Ф. Омалиус Ф. Аллуа, 1822 г.</i>	38	13,4					
			54,9	10,1					
		144	ЮРСКАЯ J (ЮРСКИЙ)	163	19,0				
				188	25,0				
		213	ТРИАСОВАЯ T (ТРИАСОВЫЙ)	231	18,0				
				243	12,0				
		248	ПЕРМСКАЯ P (ПЕРМСКИЙ)	258	10,0				
				300	14,0				
360	КАМЕННОУГОЛЬНАЯ C (КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ)	320	20,0						
		374	14,0						
408	ДЕВОНСКАЯ D (ДЕВОНСКИЙ)	421	13,0						
		448	10,0						
509	СИЛУРИЙСКАЯ S (СИЛУРИЙСКИЙ)	523	18,0						
		540	17,0						
570	ОРДОВИКСКАЯ O (ОРДОВИКСКИЙ)	587	13,0						
		595	17,0						
НИЖНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ1	КАЕМБРИЙСКАЯ C (КАЕМБРИЙСКИЙ)	620	15,0						
		650	17,0						
НИЖНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ2	СРЕДНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ2	680	15,0						
		700	17,0						
НИЖНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ3	ВЕРХНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ3	720	15,0						
		740	17,0						
НИЖНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ4	НИЖНИЙ ПАЛЕОЗОЙ PZ4	760	15,0						
		780	17,0						

ОБЩАЯ СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ (ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ) ШКАЛА

1993 г.

При составлении использованы:
 Геохронологическая таблица ВСЕГЕИ - МГУ, 1984 г.,
 Геологический словарь, 1978 г.,
 Стратиграфический кодекс МСК, 1992 г.

Составили: А.И.Жамойда (МСК), О.А.Мазарович (МГУ), Р.И.Соколов (ВСЕГЕИ)

ШКАЛА ЧЕТВЕРТИЧНОЙ СИСТЕМЫ

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА			
СИСТЕМА	РАЗДЕЛ	ЗВЕНО	СТУПЕНЬ
ЧЕТВЕРТИЧНАЯ Q	ГОЛОЦЕНОВЫЙ Q _H	0,01	СОВРЕМЕННОЕ Q _{IV}
			ВЕРХНЕЕ Q _{III}
	ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ Q _P	ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ И ГОЛОЦЕНОВЫЙ ОБЪЕДИНЕННЫЕ (НЕРАСЧЛЕННЫЕ) Q _{PH}	СРЕДНЕЕ Q _{II}
			НИЖНЕЕ Q _I
	ЭОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ Q _E	1,6	ВЕРХНЕЕ Q _{EII}
			НИЖНЕЕ Q _{EI}

Q_{III}¹, Q_{III}² и т.д.
 Q_{II}¹, Q_{II}² и т.д.
 Q_{EII}¹, Q_{EII}² и т.д.
 Q_{EI}¹, Q_{EI}² и т.д.

ШКАЛА ДОКЕМБРИЯ (PЄ)

ЭРАТЕМА (ЭРА)	ЗОНОТЕМА (ЗОН)	СИСТЕМА (ПЕРИОД)	ОТДЕЛ (ЭПОХА)
ПРОТЕРОЗОЙ PR	PR ₂	ВЕРХНИЙ (ПОЗДНИЙ) ПРОТЕРОЗОЙ	ВЕРХНИЙ (ПОЗДНИЙ) V ₂
			НИЖНИЙ (РАННИЙ) V ₁
	~ 1080	РИФЕЙ R	ВЕРХНЯЯ ЧАСТЬ PR ₁
			НИЖНЯЯ ЧАСТЬ PR ₁
	1650±50	1900±50	ВЕРХНИЙ (ПОЗДНИЙ) R ₃
			СРЕДНИЙ (СРЕДНИЙ) R ₂
	2500±50	850	ВЕРХНИЙ (ПОЗДНИЙ) AR ₂
			НИЖНИЙ (РАННИЙ) AR ₁

V₂ 50,0
 V₁ 30,0
 R₃ 350
 R₂ 350
 R₁ 300
 AR₂ 650
 AR₁ 600

3. Эммонс, 1887 г.

Красные цифры - начало геохронологических подразделений (млн.лет), черные - продолжительность

Основные параметры галактической модели

1. Модель Галактики по J. Vallee (Vallee, 2002)
2. Два струйных потока, закрученных в спирали Архимеда (Баренбаум, 1991)
3. Эллиптическая орбита Солнца с вращением линии апсид (Баренбаум, 1999)
4. Периоды орбитального движения Солнца в Галактике:
 - аномалистический $T_R = 250$ млн лет
 - сидерический $T_\varphi = 222.223$ млн лет (Баренбаум, 2015)
 - драконический $T_Z = 50$ млн лет
 - вращения линии апсид орбиты $T_\alpha = 2000$ млн лет
5. Периоды вращения Галактики:
 - спиральных рукавов $T_G = 200$ млн лет
 - ядерного диска $T_d = 50$ млн лет

6. Резонансные соотношения периодов:

$$T_\alpha : T_R : T_\varphi : T_G : T_d : T_Z = 1 : 8 : 9 : 10 : 80 : 80$$

(Баренбаум, 2018)

Оптимизация астрономических параметров Модели

Критерий оптимизации:

$$\Delta\bar{R} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_1^{15} \Delta R_i^2}$$

где $\Delta\bar{R}$ – минимизируемая невязка – средняя «полуширина» галактических рукавов

Варьируемые параметры модели

- 1) Расстояние Солнца $7.2 \leq R_\odot \leq 10.0$ Кпк с шагом 0.05 Кпк,
- 2) Угол закрученности рукавов $70^\circ \leq \mu \leq 90^\circ$ с шагом 0.05°
- 3) Эксцентриситет орбиты $0.34 \leq e \leq 0.42$ с шагом 0.05 .
- 4) Большая полуось α и эксцентриситет e солнечной орбиты удовлетворяют условию: $\alpha(1+e) = R^* = R_{\max}$

Выполнено более 100 000 расчетов

Оптимальными признаны значения:

$$R_\odot = 8.35 \pm 0.05 \text{ Кпк}$$

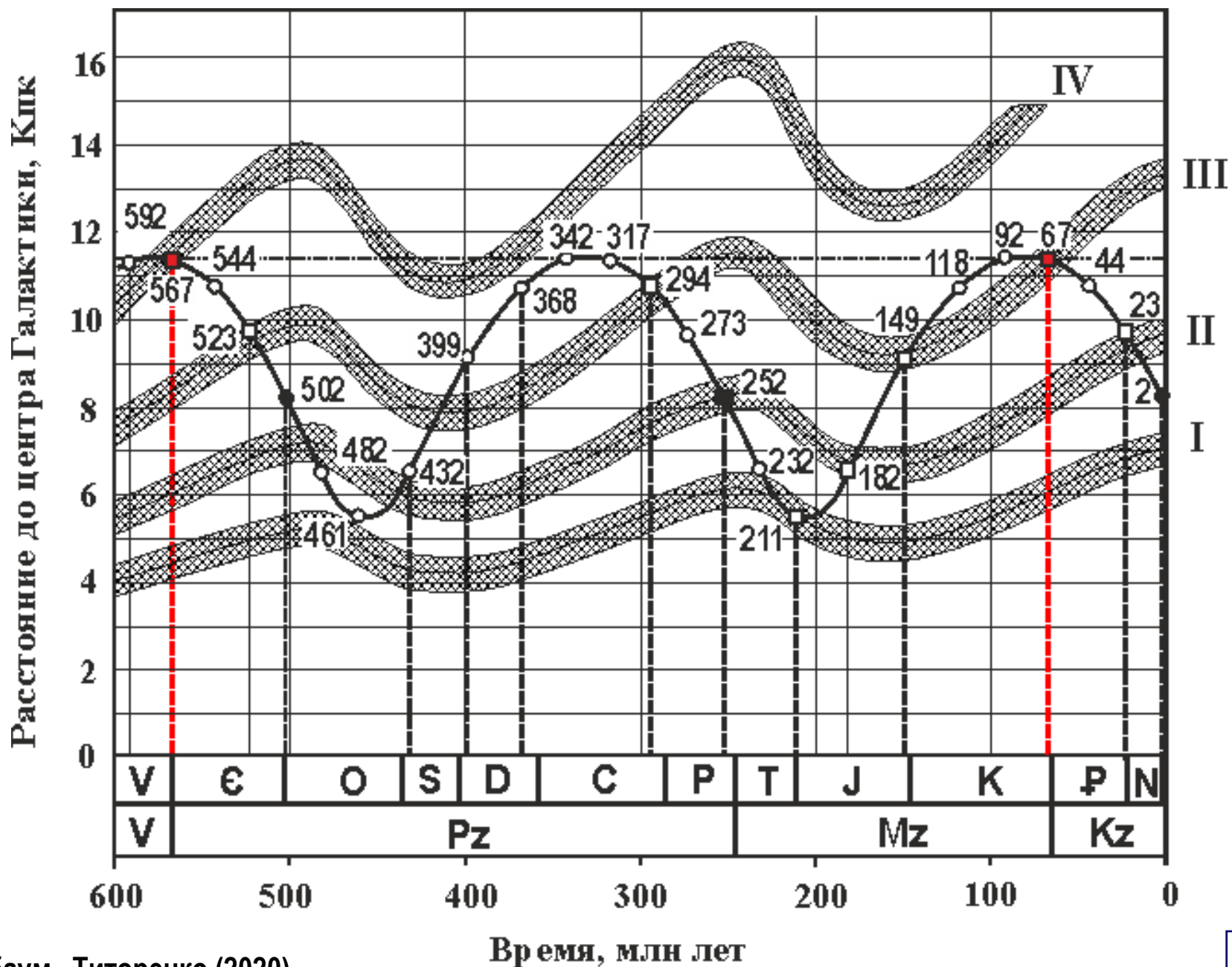
$$\mu = 77.8 \pm 0.05^\circ,$$

$$e = 0.37 \pm 0.005$$

$$\alpha = 8.373 \text{ Кпк}$$

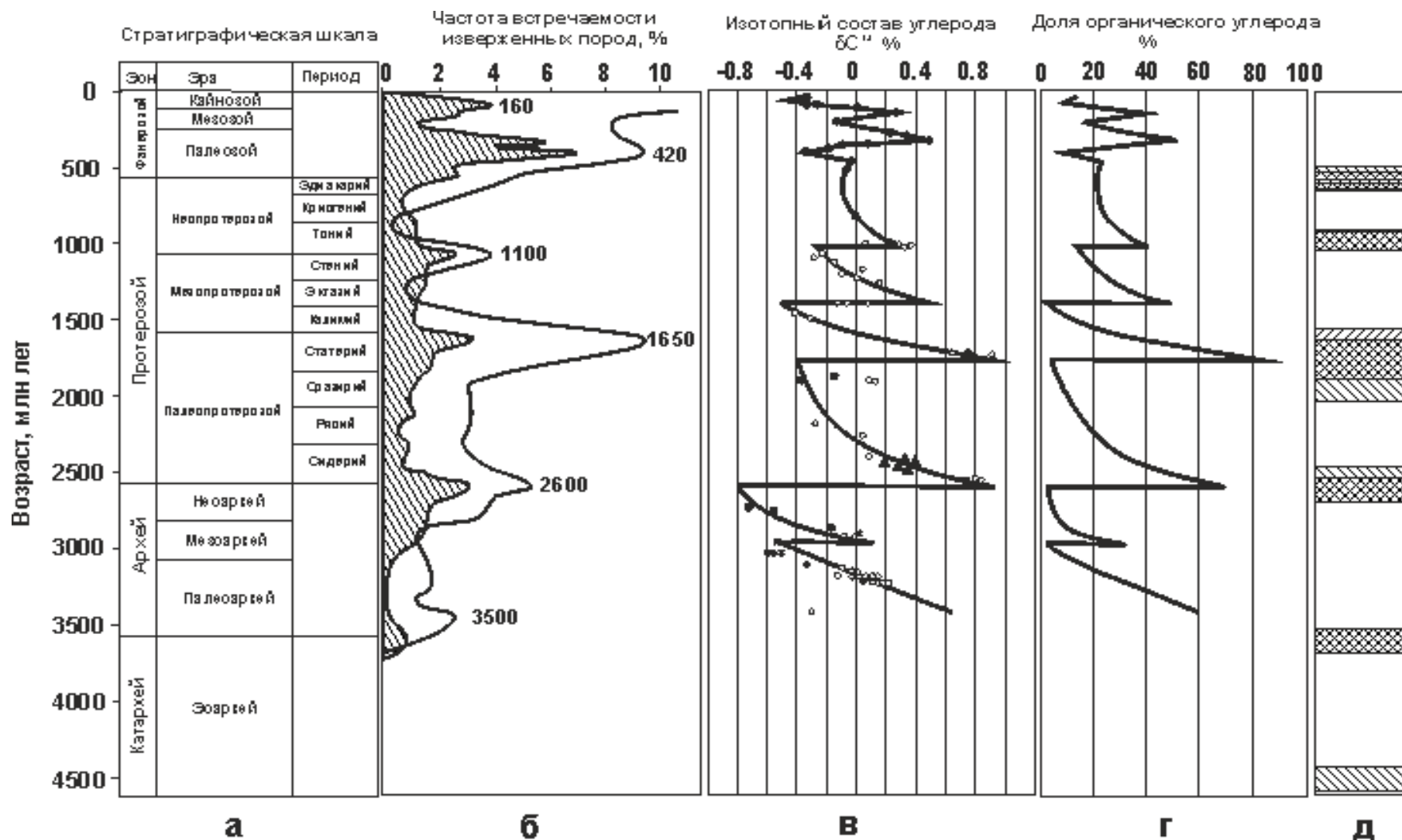
$$\Delta\bar{R} = 0.4 \text{ Кпк}$$

Расчет времен границ Фанерозоя по галактической модели



**Построение адекватной
геохронологической шкалы
Докембрия**

Современное состояние геохронологической шкалы Докембрия



а) Международная шкала; б) мегациклы процессов тектономагматической активности (заштриховано) и рудообразования (Пушкарев, 1990); в) изменения изотопного состава углерода карбонатных пород (Галимов и др., 1975); г) доля органики в углероде осадочных пород (Баренбаум, 1998); д) этапы эволюции живых организмов в докембрии (Б.С.Соколов, 1976) – левая штриховка, и главные эпохи развития углеродсодержащих формаций (Сидоренко, 1991)– правая штриховка

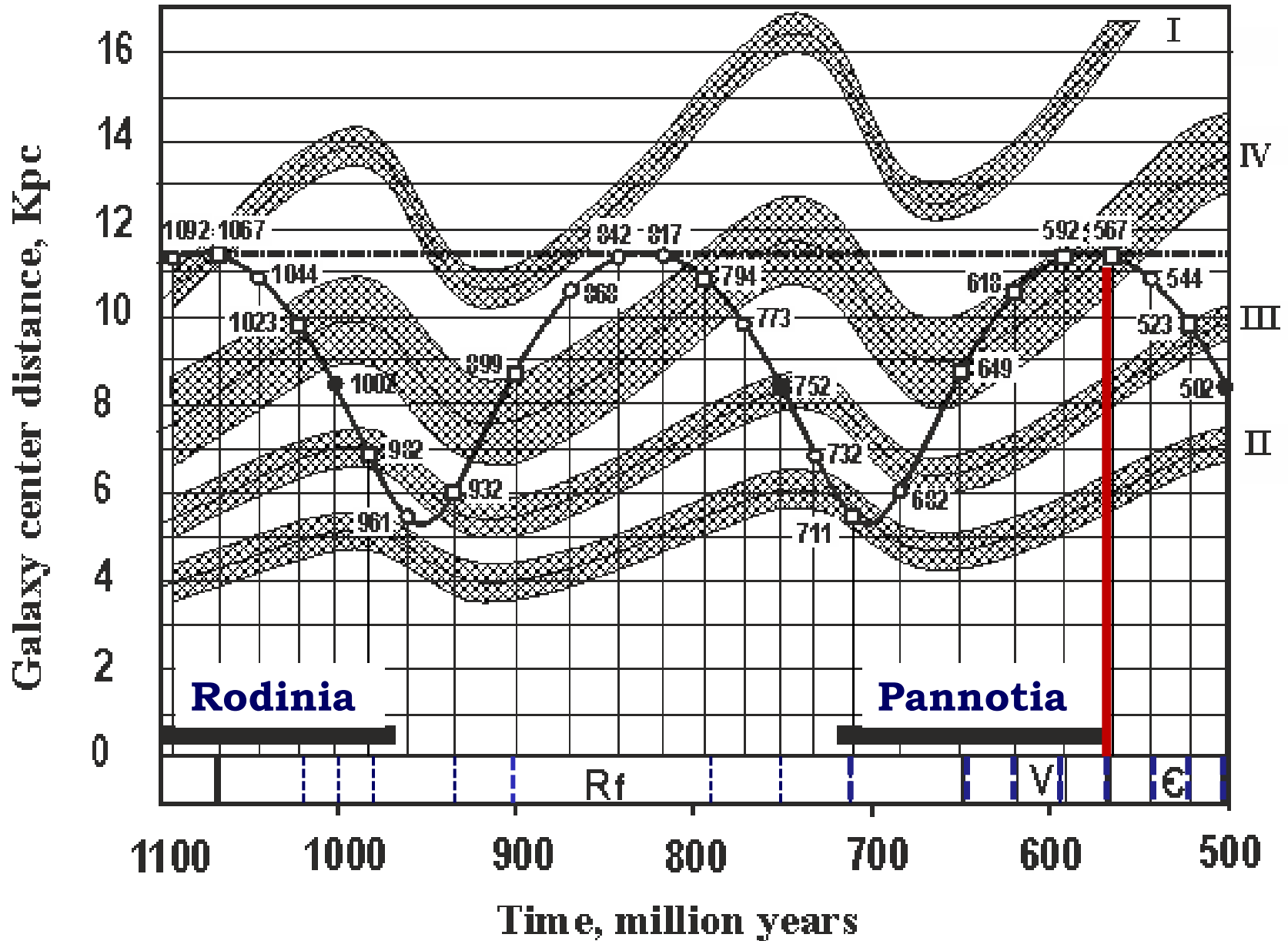
Времена мега-событий в истории Земли



Бомбардировки галактическими кометами в рукавах Галактики на расстоянии радиуса коротации от ее центра

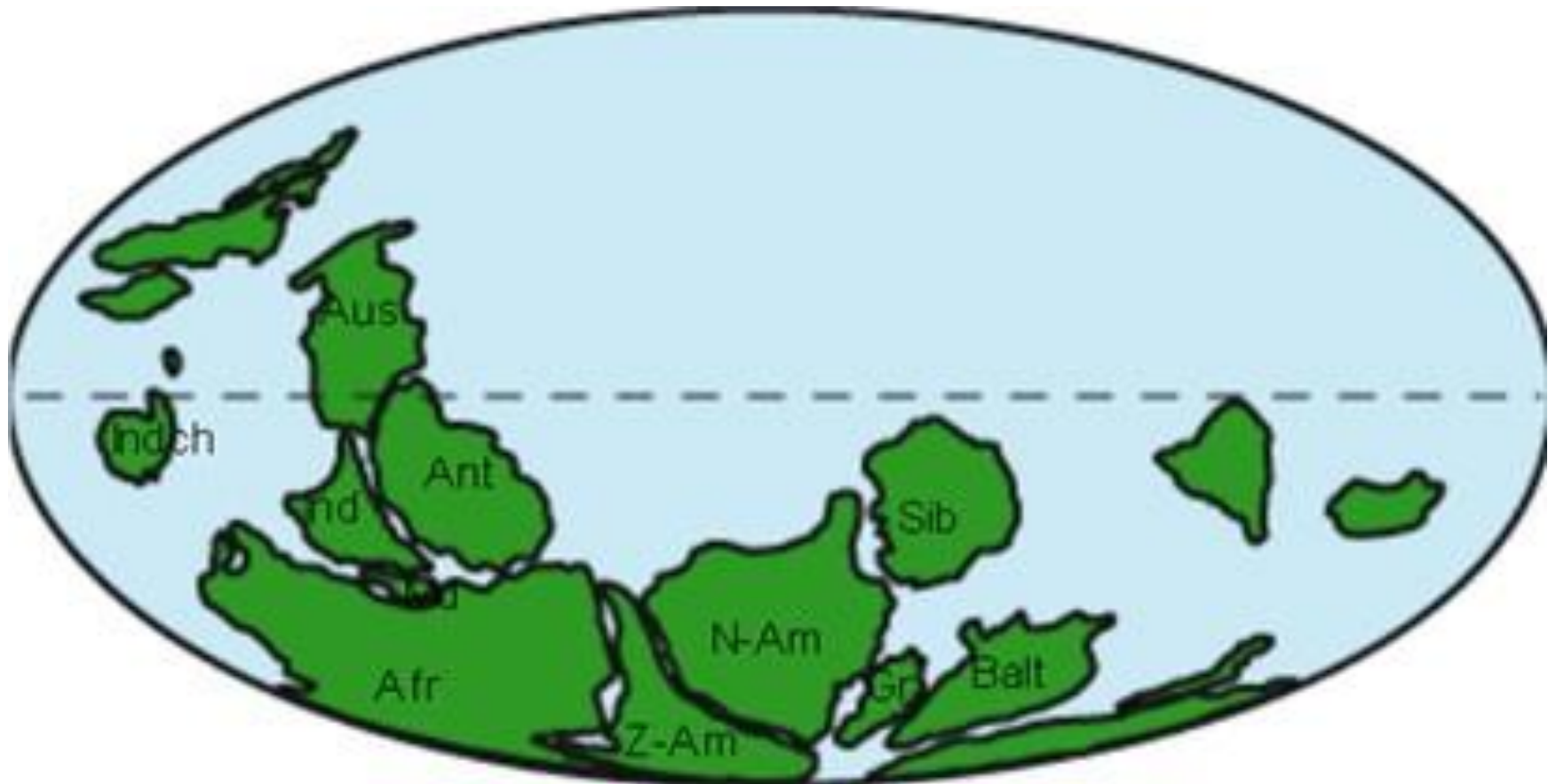
Галактический рукав	Время события, млрд лет	Границы эонов и эонотем
I. Carina-Sagittarius	1.067 3.067	Неопротерозой -----
II. Perseus	1.567 3.567	Мезопротерозой Палеоархей
III. Norma-Perseus+1	2.067 4.067	----- Эоархей
IV. Crux-Scutum	0.567 2.567 4.567 6.567	Фанерозой Протерозой 2-й цикл планетообразования Образование Солнечной системы

Шкала неопротерозоя и кембрия по Модели 6 с увеличенной шириной рукава IV



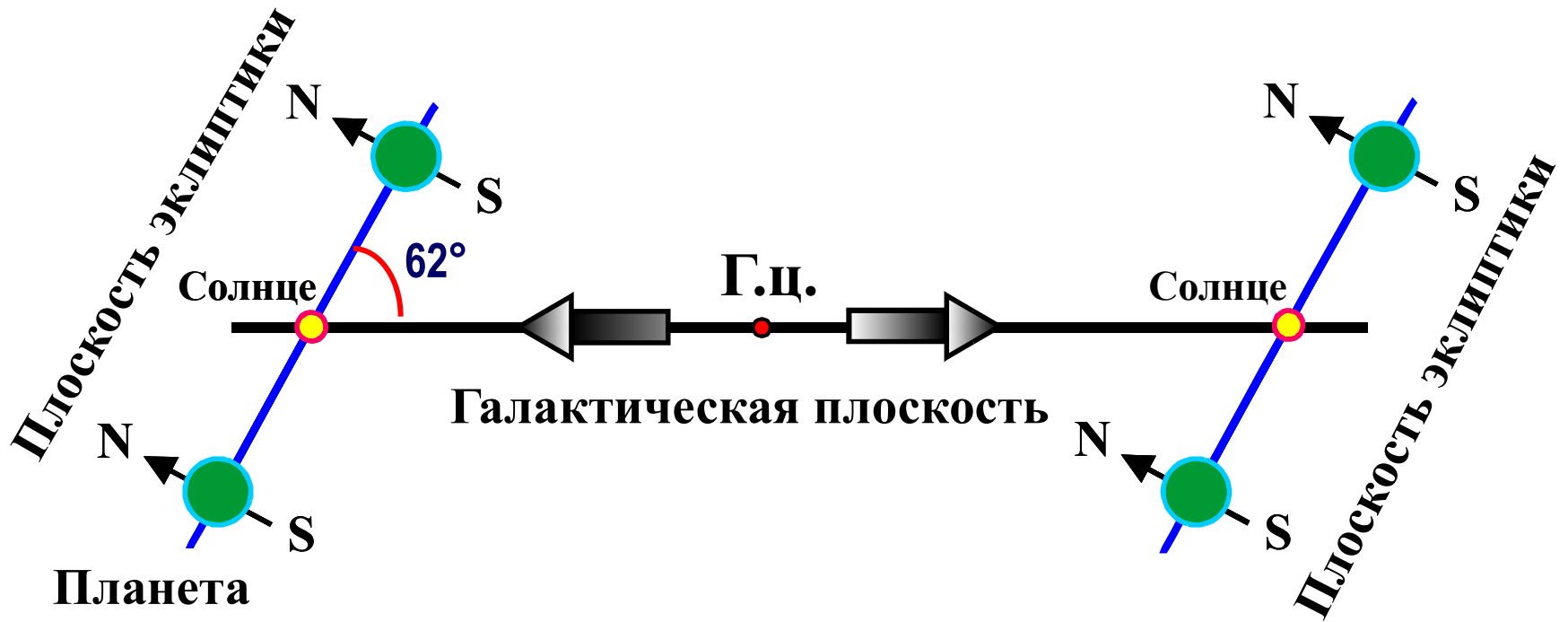
**Объяснение
суперконтинентальной
цикличности на основе
галактической модели**

Палеореконструкция положения материков суперконтинента Pannotia 650 млн лет назад

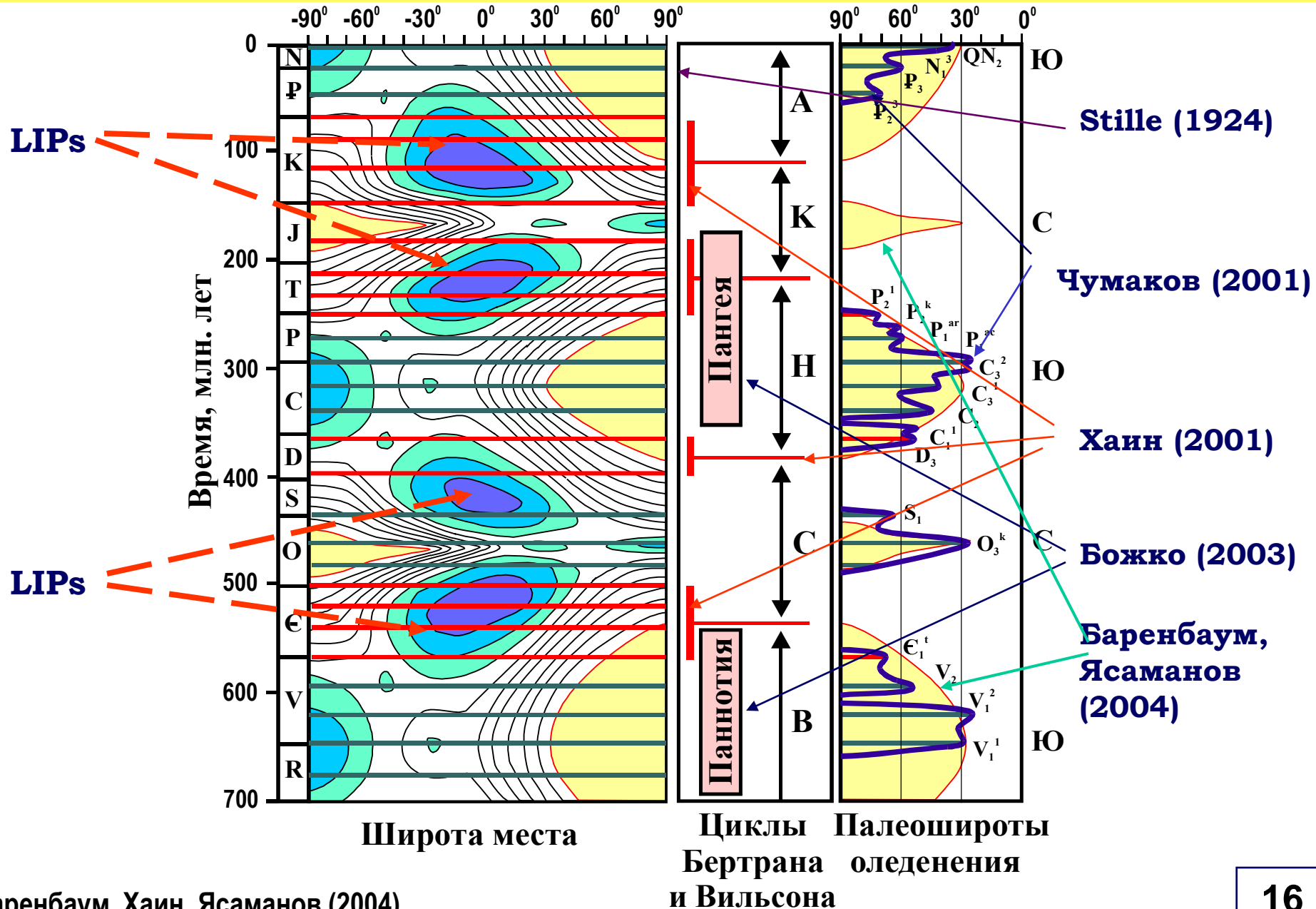


**Паннотия по гречески означает «вся южная земля»
Вендский суперконтинент (720–570 млн лет назад)**

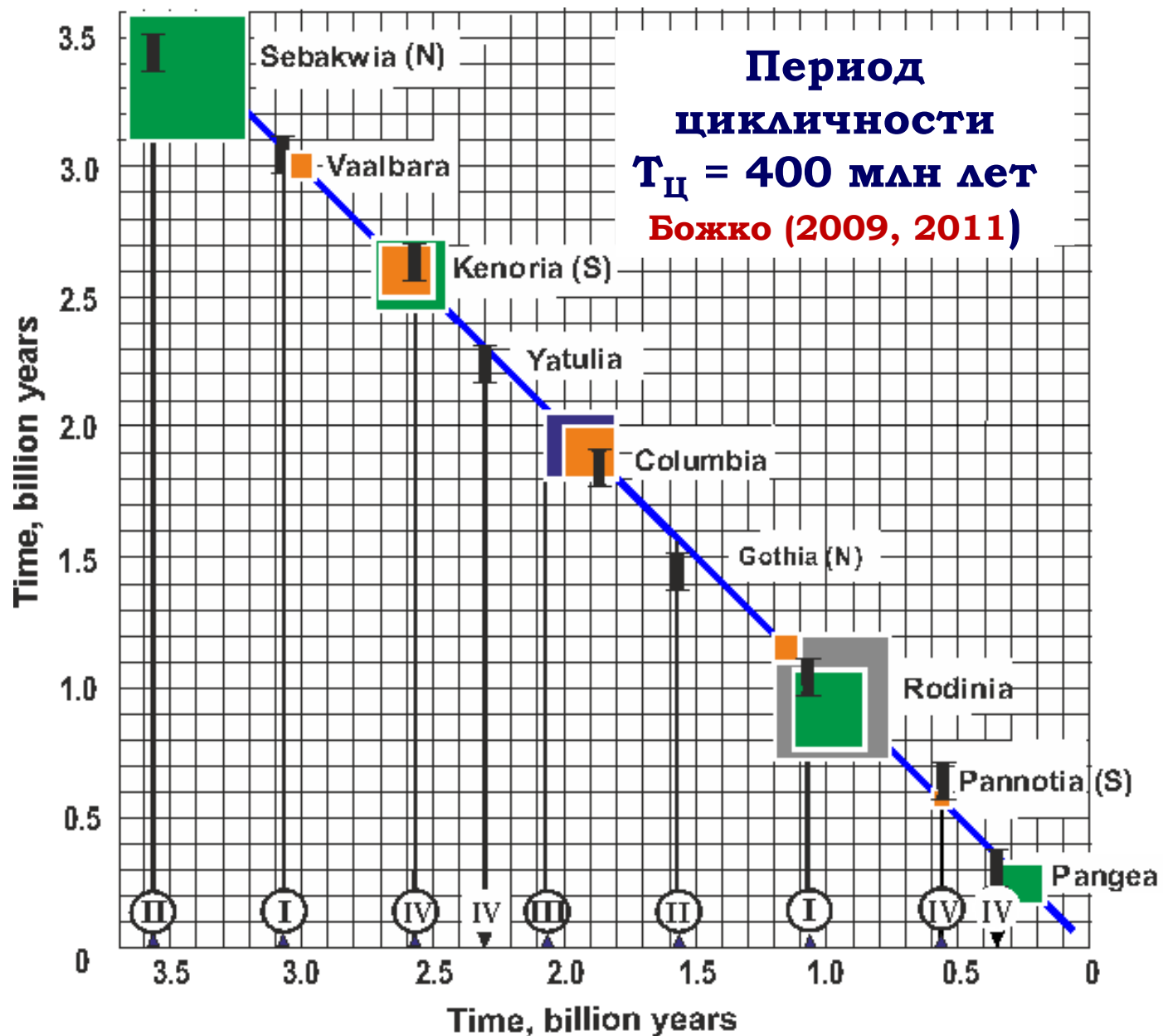
Направление прилета галактических комет в Солнечную систему



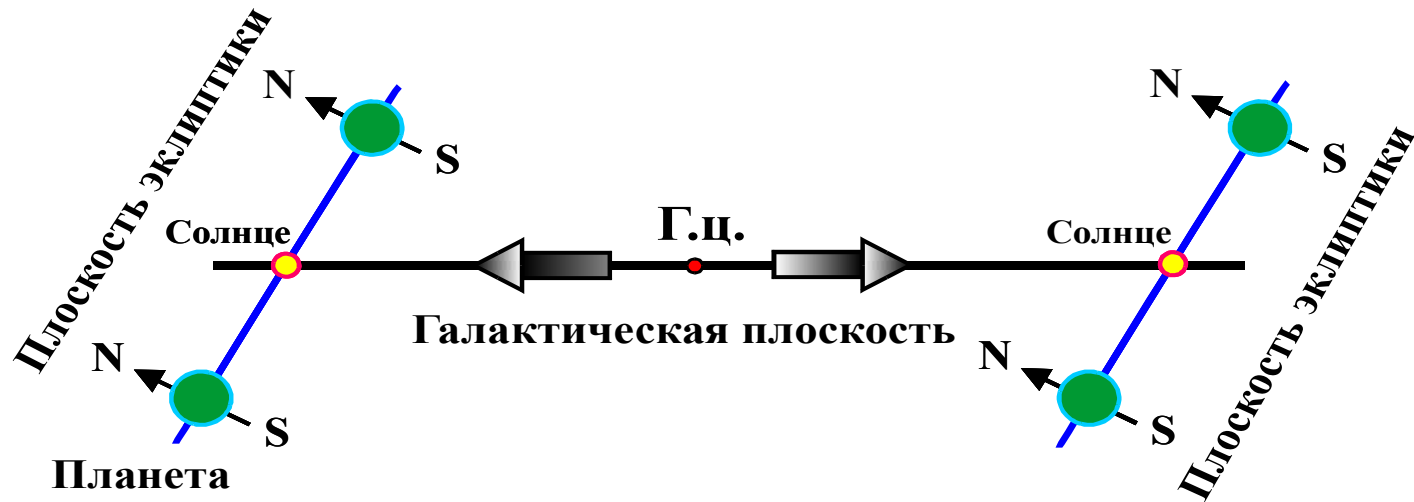
Планетарные геодинамические и климатические процессы на Земле, вызванные падениями галактических комет



Цикличность и полярность образования суперконтинентов



Прецессия плоскости эклиптики Солнечной системы



Период прецессии плоскости эклиптики Солнечной системы

$$T_E = (T_{\text{Ц}}^{-1} - T_{\text{В}}^{-1})^{-1} = 2000 \text{ млн лет}$$

где: $T_{\text{SC}} = 400$ млн лет – период суперконтинентальных циклов,

$T_{\text{В}} = 500$ млн лет – период наиболее интенсивных кометных бомбардировок в галактических рукавах

Период прецессии плоскости эклиптики в точности равен периоду вращения линии апсид орбиты Солнца в Галактике

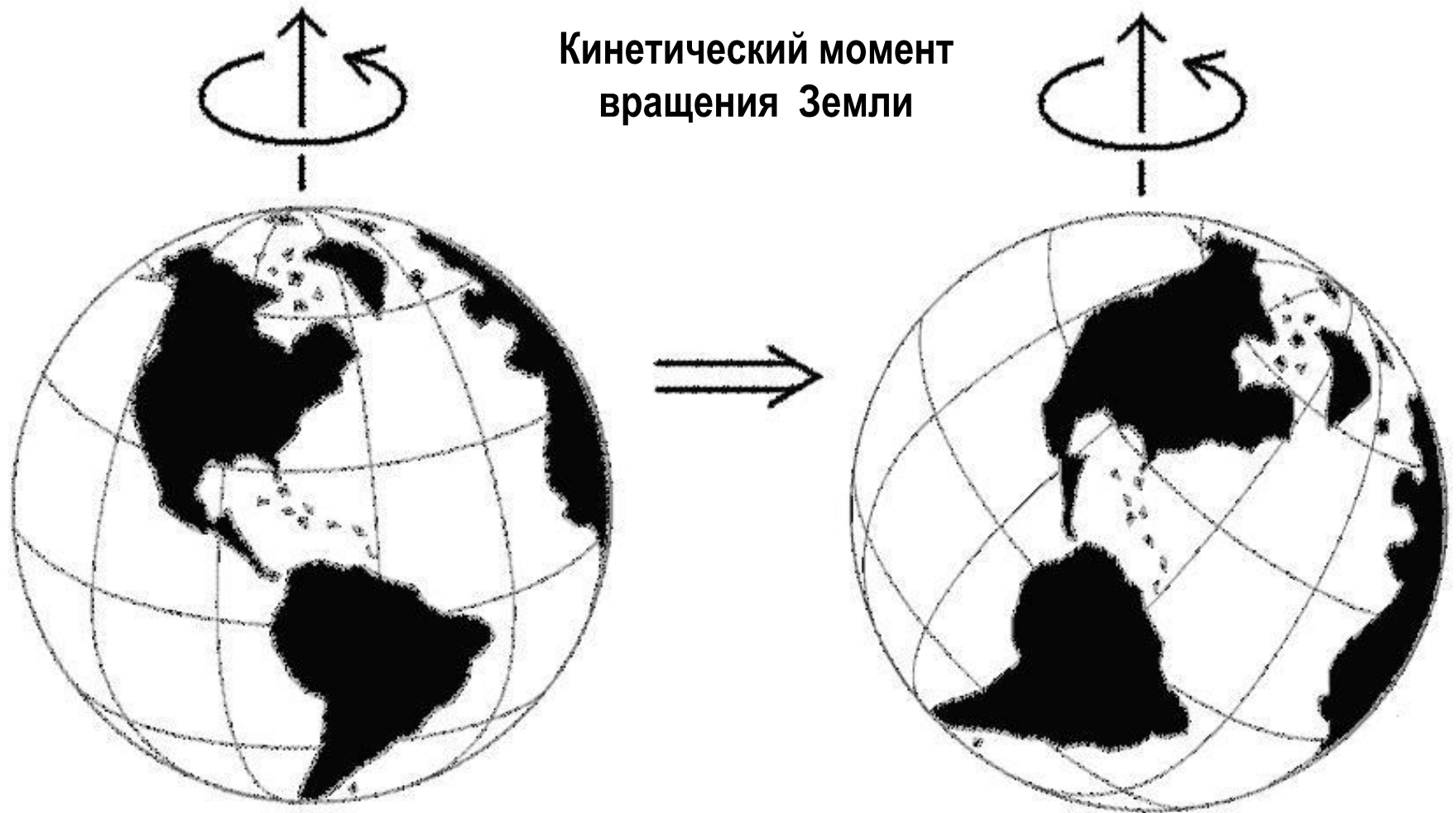
**Феномен
«ИСТИННЫХ ПОЛЯРНЫХ
блужданий»**

Истинное полярное блуждание – это смещение географических полюсов Земли относительно ее поверхности при изменении главной оси инерции тела планеты.

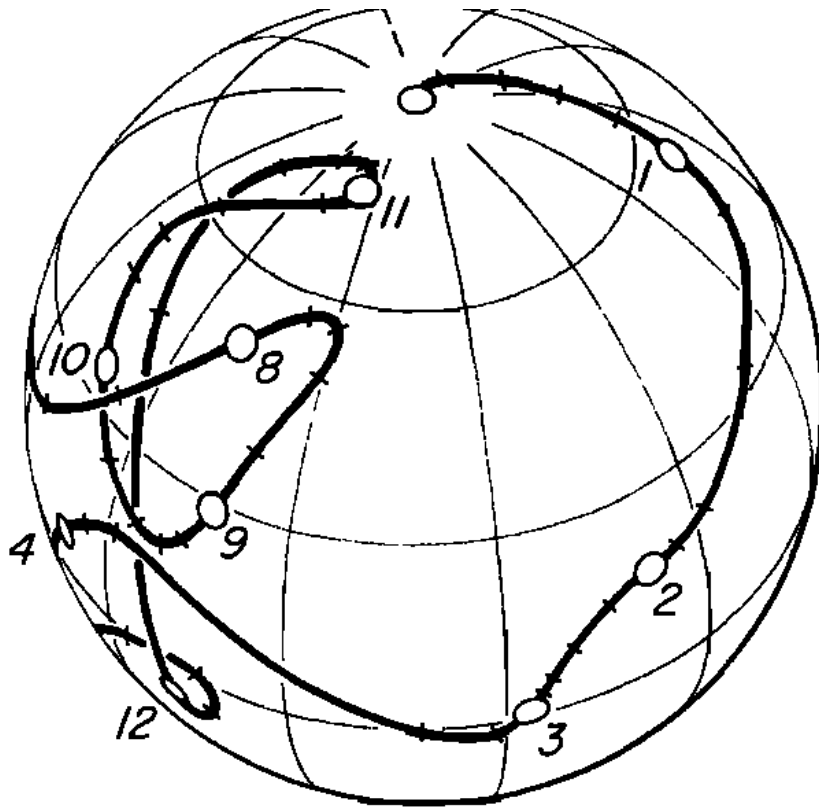
Истинное полярное блуждание – сдвиг географических полюсов относительно поверхности Земли после учета движения тектонических плит.

Истинное полярное блуждание — это вращение всей твердой Земли относительно оси вращения, происходящее в ответ на перераспределение плотностных неоднородностей в мантии и соответствующие изменения момента инерции Земли.

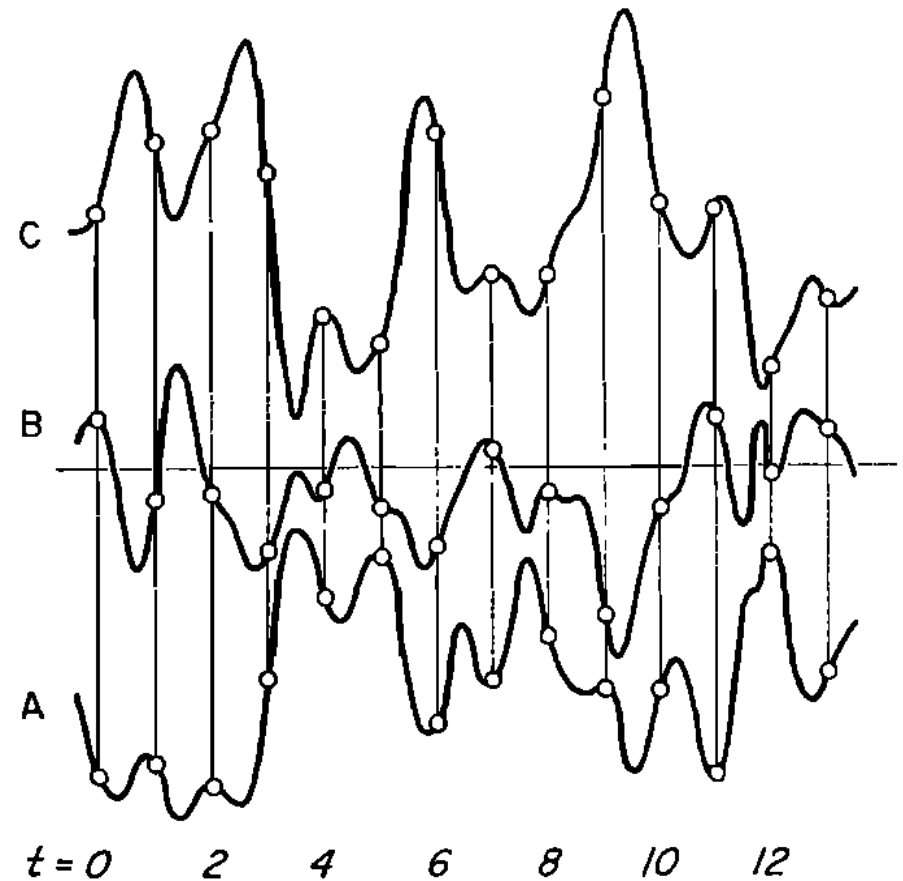
Истинное полярное блуждание (True polar wander)



Смоделированная кривая полярного блуждания (Goldreich P., Toomre A., 1969)



а



б

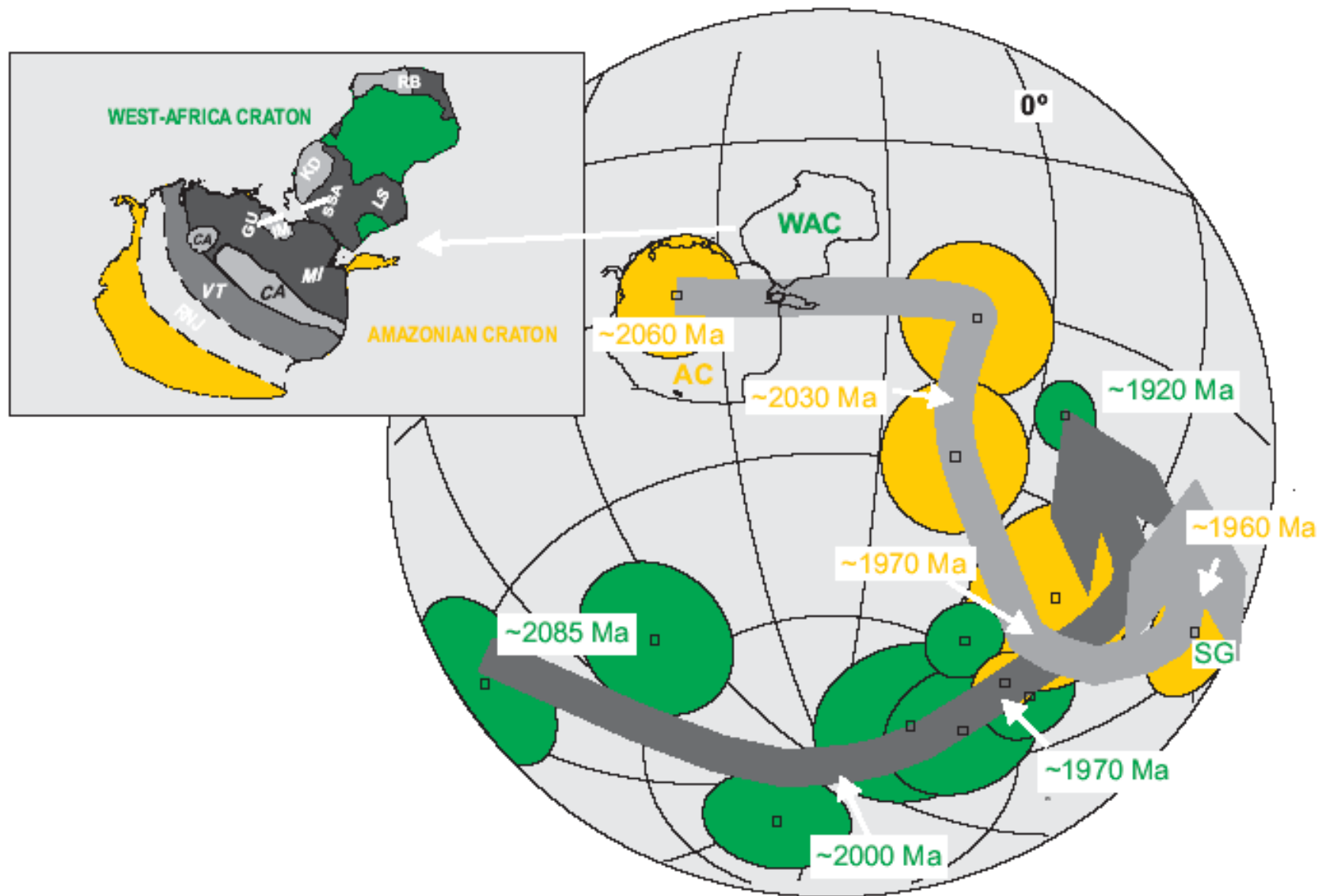
- а) Маркеры на пути движения полюса Земли обозначают «время» $t = 0, 2, 4, 6$ и т. д.
б) Изменения моментов инерции Земли во времени: А – главного (наибольшего),
Б - среднего и С – наименьшего. Линия - среднее значение моментов инерции.

Моменты подобраны искусственно. Такое их изменение физически не обосновано!!!

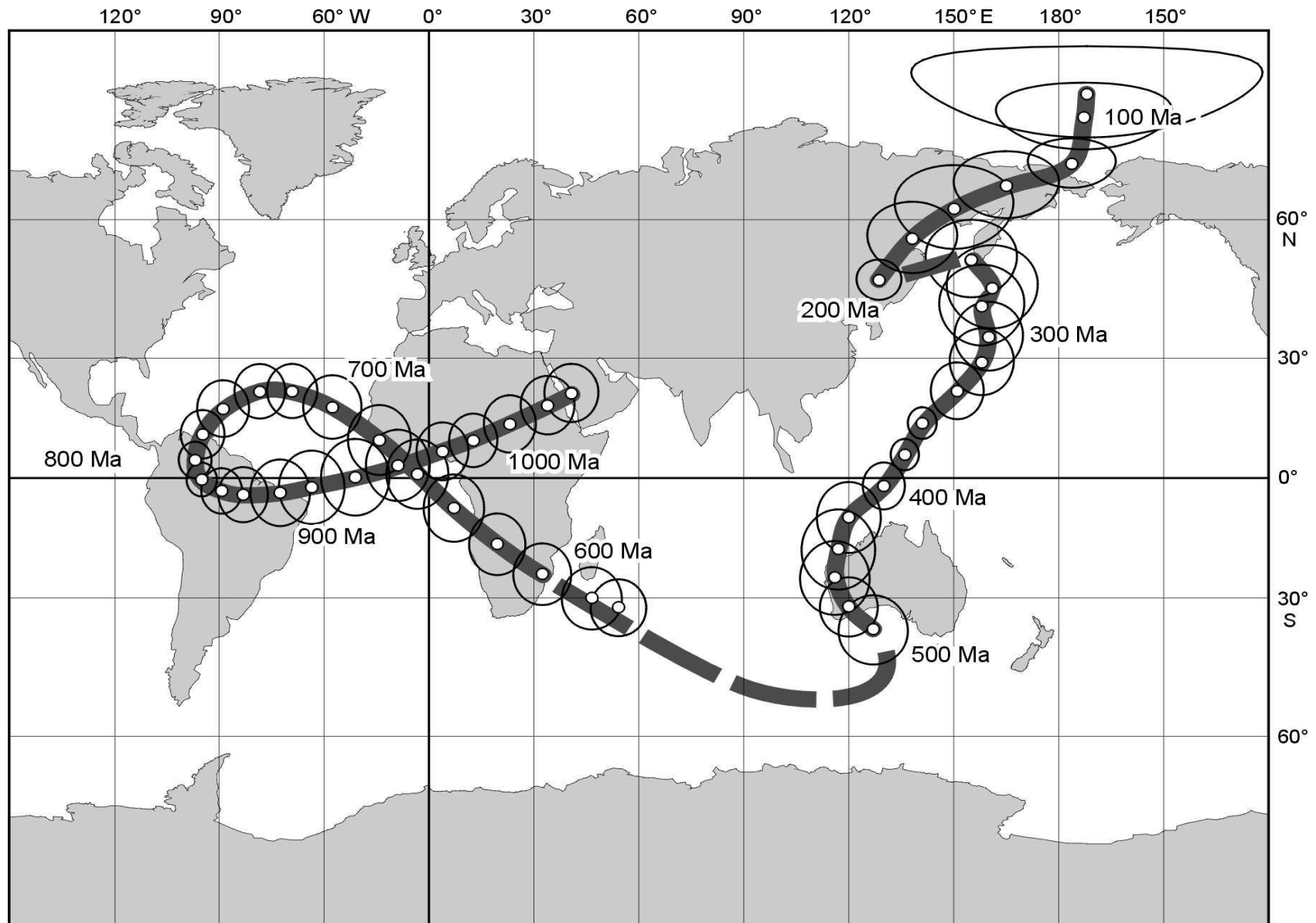
Последовательность действий при определении траекторий движения полюса вращения Земли

- 1 – Измеряют палеомагнитными методами положения магнитного полюса Земли во времени на отдельных плитах, полагая, что направления оси вращения Земли и оси геомагнитного диполя планеты совпадают.**
- 2 – Усредняют положения магнитного полюса Земли по измерениям на разных плитах, считая изменения его положения во времени у плит одинаковы в некоторой мантийной системе отсчета.**
- 3 – Для этой системы отсчета определяют абсолютное движение плиты относительно полюса вращения Земли, т.е. находят траекторию «кажущегося» перемещения полюса по каждой плите.**
- 4 – Вычитая абсолютное движение плиты из движения относительно оси вращения, определяют изменение положения оси вращения во времени в мантийной системе отсчета, тем самым находят направление и скорость TPW перемещения полюса вращения Земли относительно мантии.**

Сравнение траекторий APW, построенных для Амазонского кратона (желтый цвет) и Западно-Африканского кратона (зеленый цвет) между 2080 и 1920 млн лет назад



Траектория кажущегося полярного блуждания Сибири (Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu. 2012)



1. Величина и направление вектора кинетического момента вращения Земли не сохраняется в условиях внешних космических воздействий. Их влияние на плиты неизвестно.
2. Дипольное геомагнитное поле подвержено переполюсовкам и определяется процессами в земном ядре, а не в мантии.
3. Вязкость мантии на 2-3 порядка выше, чем допускает изменение планетарного момента инерции Земли за 1–10 млн лет.
4. Трудности выбора надежной системы отсчета по горячим точкам в мантии для вращения «твердой Земли».
5. Трудности объяснения движения плит мантийной конвекцией.
6. Близкие углы наклона к эклиптике оси вращения ряда планет: Земли ($23,44^\circ$), Марса ($25,2^\circ$), Сатурна (26.73°) и Нептуна (28.32°)

**Интерпретация TRW феномена
на основе галактической модели
с участием силы Кориолиса**

Сила Кориолиса

Из механики известно, что тела, движущиеся прямолинейно в инерциальной системе отсчета, во вращающейся системе испытывают ускорение, перпендикулярное их движению

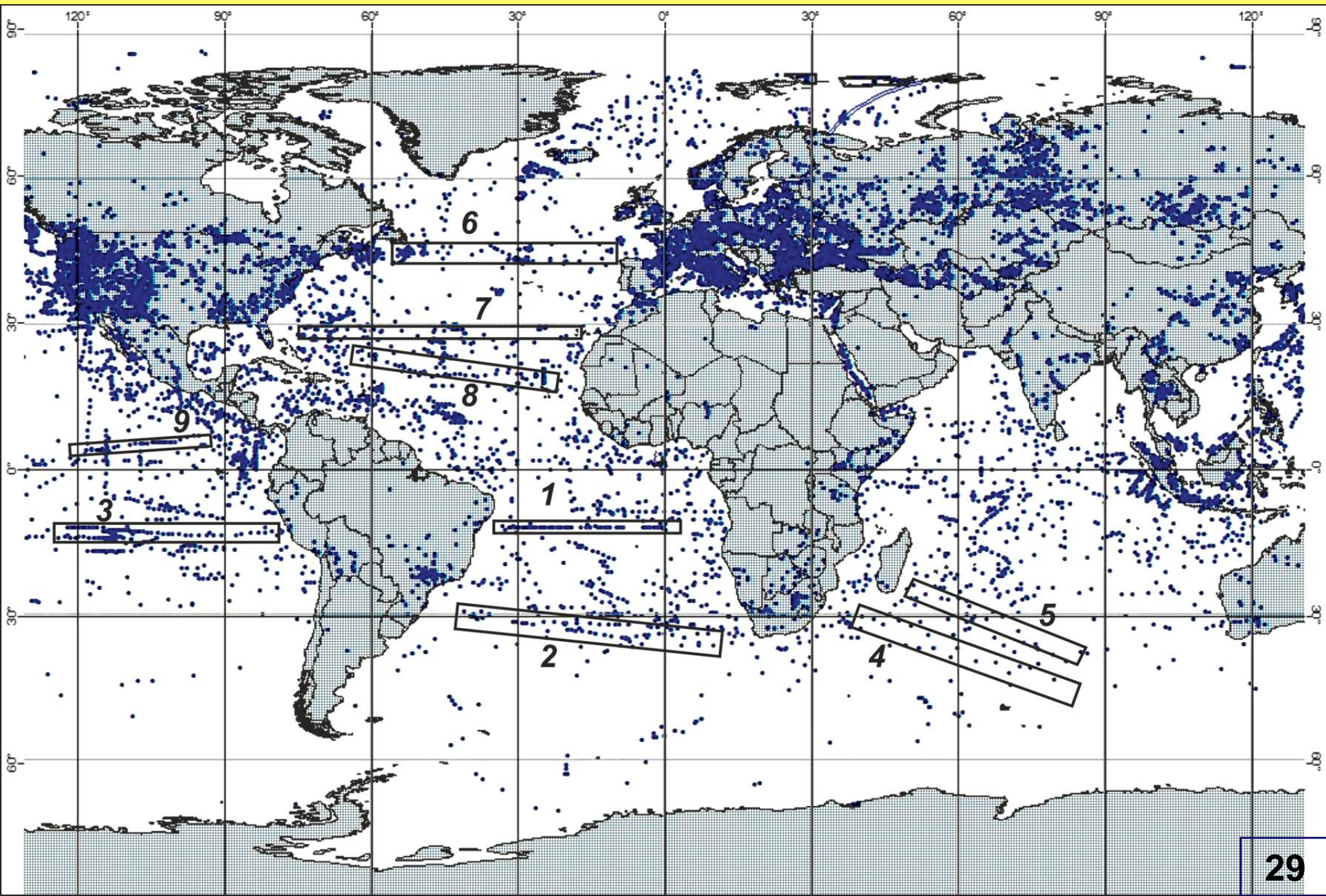
$$\alpha = 2[\mathbf{V} \times \boldsymbol{\omega}] = 2V \cdot \omega \cdot \sin\varphi \quad (1)$$

где: V – скорость тела, ω – угловая скорость вращения системы координат, φ – угол между векторами V и ω .

На Земле ω – угловая скорость вращения, а φ – широта места.

При движении по земной поверхности в северном полушарии тела отклоняются вправо по ходу движения, а в южном – влево

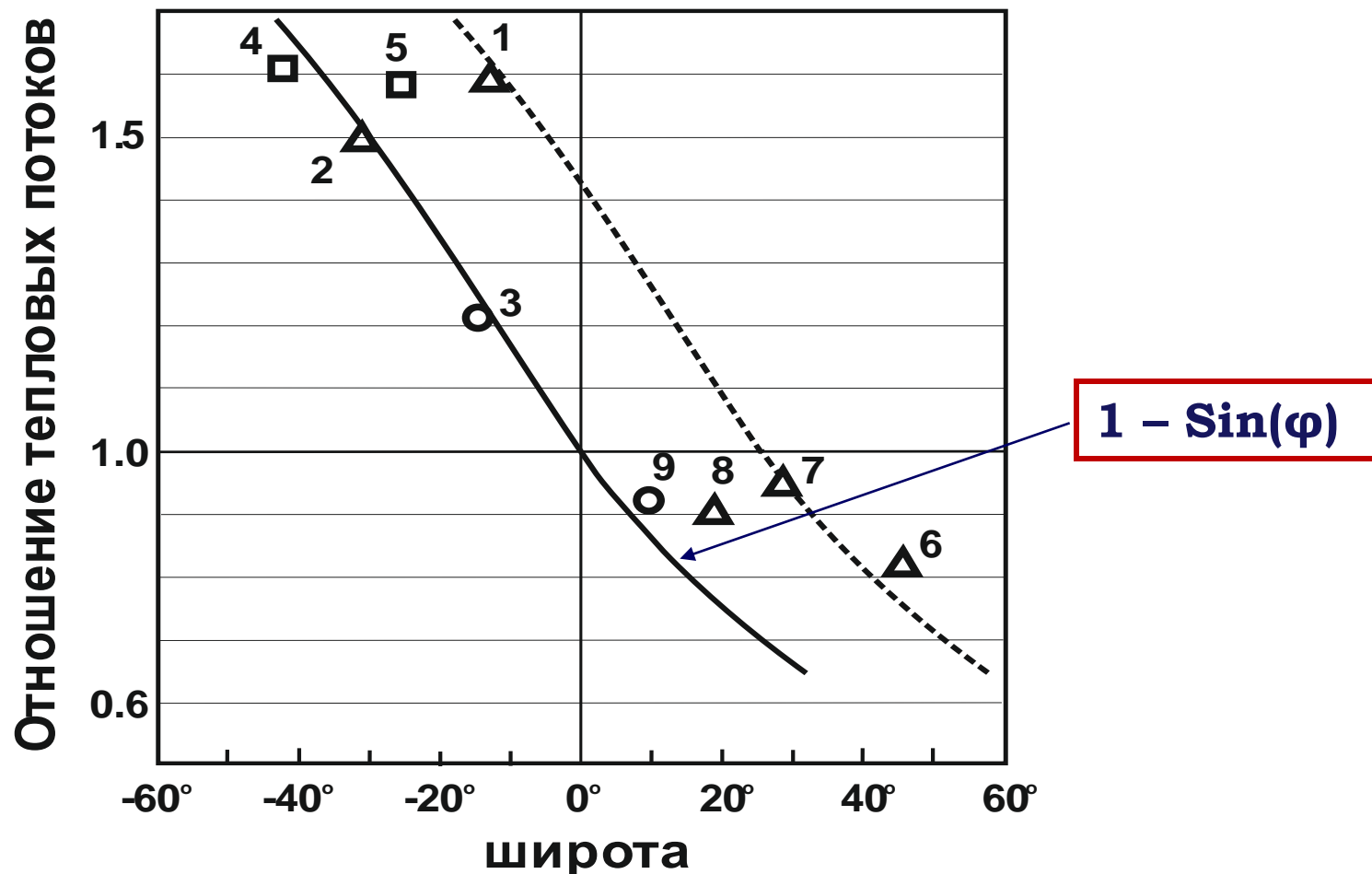
Расположение точек измерения теплового потока и исследованных геотраверсов в Мировом океане по [Хуторской, Тевелева, 2018]



Средние тепловые потоки на западном и восточном крыльях геотраверсов [Хуторской, Тевелева, 2018] и их отношение

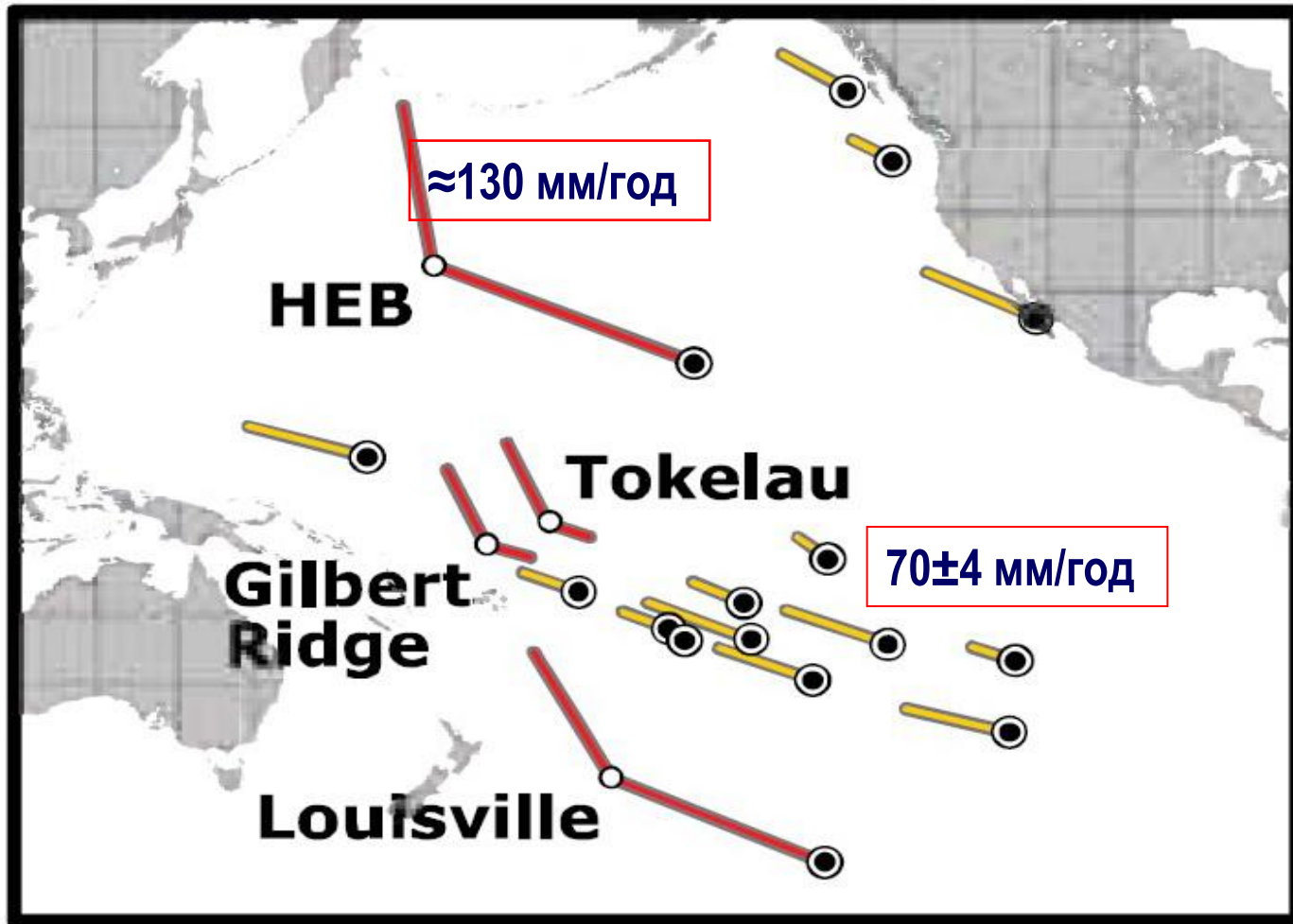
№ геотраверса Широта места	Крылья	Среднее значение потоков, мВт/м ²	среднеквадратиче ское отклонение	количество измерений	Отношение потоков
№ 1 -12° ю.ш.	запад	62	25	16	1.59
	восток	39	21	18	
№ 2 -31° ю.ш.	запад	91	94	6	1.49
	восток	61	62	27	
№ 3 -15° ю.ш.	запад	88	61	3475	1.22
	восток	72	59	3520	
№ 4 -43° ю.ш.	запад	124	79	12	1.61
	восток	77	40	48	
№ 5 -26° ю.ш.	запад	76	59	65	1.58
	восток	48	30	28	
№ 6 45° с.ш.	запад	69	57	95	0.82
	восток	84	43	200	1.22
№ 7 28° с.ш.	запад	58	48	50	0.95
	восток	61	39	20	1.05
№ 8 19° с.ш.	запад	74	51	22	0.796
	восток	93	100	30	1.257
№ 9 10° с.ш.	запад	69	53	2829	0.93
	восток	74	56	3160	1.072

Обнаружение действия силы Кориолиса по тепловым потокам в СОХ



Соотношение тепловых потоков между западным и восточным крыльями геотраверсов. Атлантический океан (треугольники), Тихий океан (кружки), Индийский океан (квадраты). Цифры – номера геотраверсов. Сплошная линия соответствует зависимости $1 - \sin(\varphi)$. Пунктирная линия – правая огибающая результатов измерений.

Гипотеза вращающейся литосферной оболочки Земли



1. Тихоокеанская плита вращается быстрее, чем мантия.
2. Существует систематическое смещение плиты на север.
3. Направление и скорость движения плиты изменились 65 млн лет назад.

Гипотеза литосферной оболочки

1. Сила Кориолиса действует как на «молодые» океанические плиты, которые движутся относительно мантии с высокой скоростью, так и на «старые» континентальные плиты, включающие древние кратоны, движущиеся относительно мантии с гораздо меньшей скоростью.
2. Все литосферные плиты образуют на Земле общую автономно вращающуюся литосферную оболочку. Эта оболочка, пребывавшая 4.6 млрд лет назад в расплавленном конвективном состоянии, с тех пор основательно остыла, но все же остается в состоянии частичного конвективного перемешивания (Баренбаум, 1992).
3. Начиная с архея, эта оболочка, состоящая из взаимодействующих плит разного возраста, перемещающихся с разными скоростями и в разных направлениях, вращается как одно целое по пластичному слою пород астеносферы со своей угловой скоростью, которая отличается (превышает) скорость вращения твердой мантии Земли.
3. Вариации TRW полюса вращения обусловлены не изменением планетарного момента инерции Земли вследствие предполагаемых процессов в мантии, а изменением положения полюса вращения литосферной оболочки (или ее части) под действием бомбардировок галактическими кометами.

Теоретическое рассмотрение

Представим скорость плит относительно мантии как $\tilde{V} = V' + V''$, где: V' – вектор скорости движения плит относительно литосферной оболочки, а V'' – вектор скорости оболочки относительно мантии.

Литосферную оболочку будем считать вращающейся системой отсчета, а мантию отождествим с Землей в целом, закрепим в ней земную ось и будем считать инерциальной системой отсчета.

Обозначим угловую скорость вращения оболочки ω_0 , а мантии ω_M .

Пусть оболочка и мантия вращаются вокруг общей оси с $\omega_0 > \omega_M$. Тогда в системе координат, связанной с мантией, плиты будут двигаться относительно мантии в западном направлении со скоростью:

$$V = R(\omega_0 - \omega_M)\cos(\varphi), \quad (2)$$

а по долготе под действием силы Кориолиса приобретут ускорение:

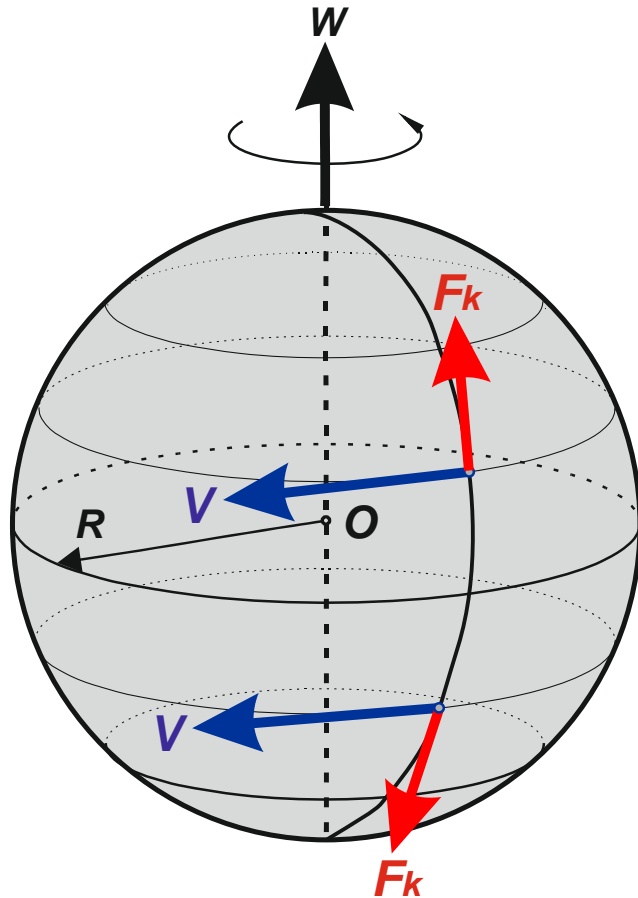
$$\alpha = 2V\omega_M\sin(\varphi) = 2R\omega_M(\omega_0 - \omega_M)\cos(\varphi)\sin(\varphi), \quad (3)$$

где R – радиус Земли, φ – широта места.

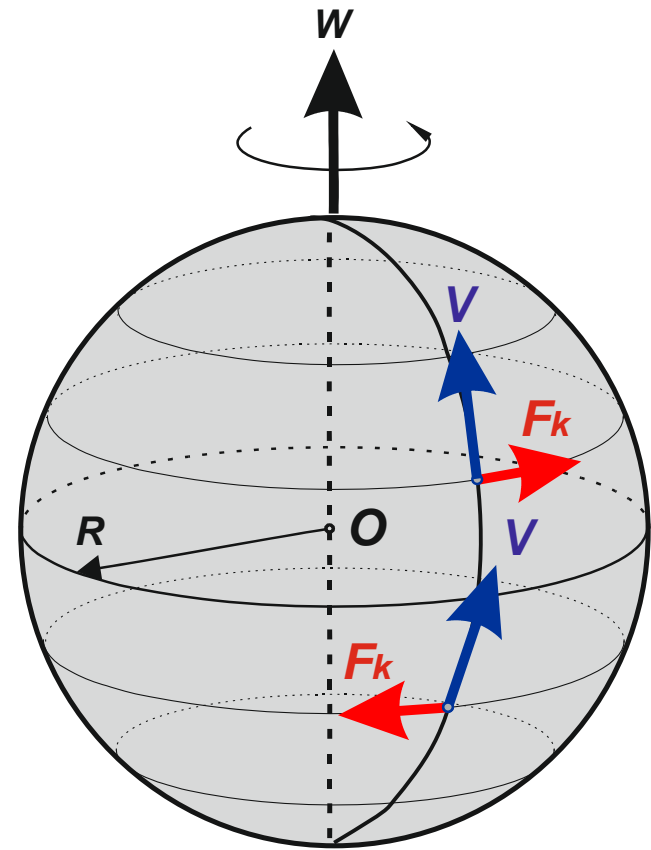
Формулы (2) и (3) показывают, что скорость плит относительно мантии V'' максимальна на экваторе ($\varphi = 0^\circ$) и снижается до 0 на северном и южном полюсе ($\varphi = \pm 90^\circ$) Земли.

В то время как влияние силы Кориолиса на движение плит максимальна на широтах $\varphi = \pm 45^\circ$, а на экваторе и на полюсах Земли сила $F_k = 0$.

Теоретическая модель



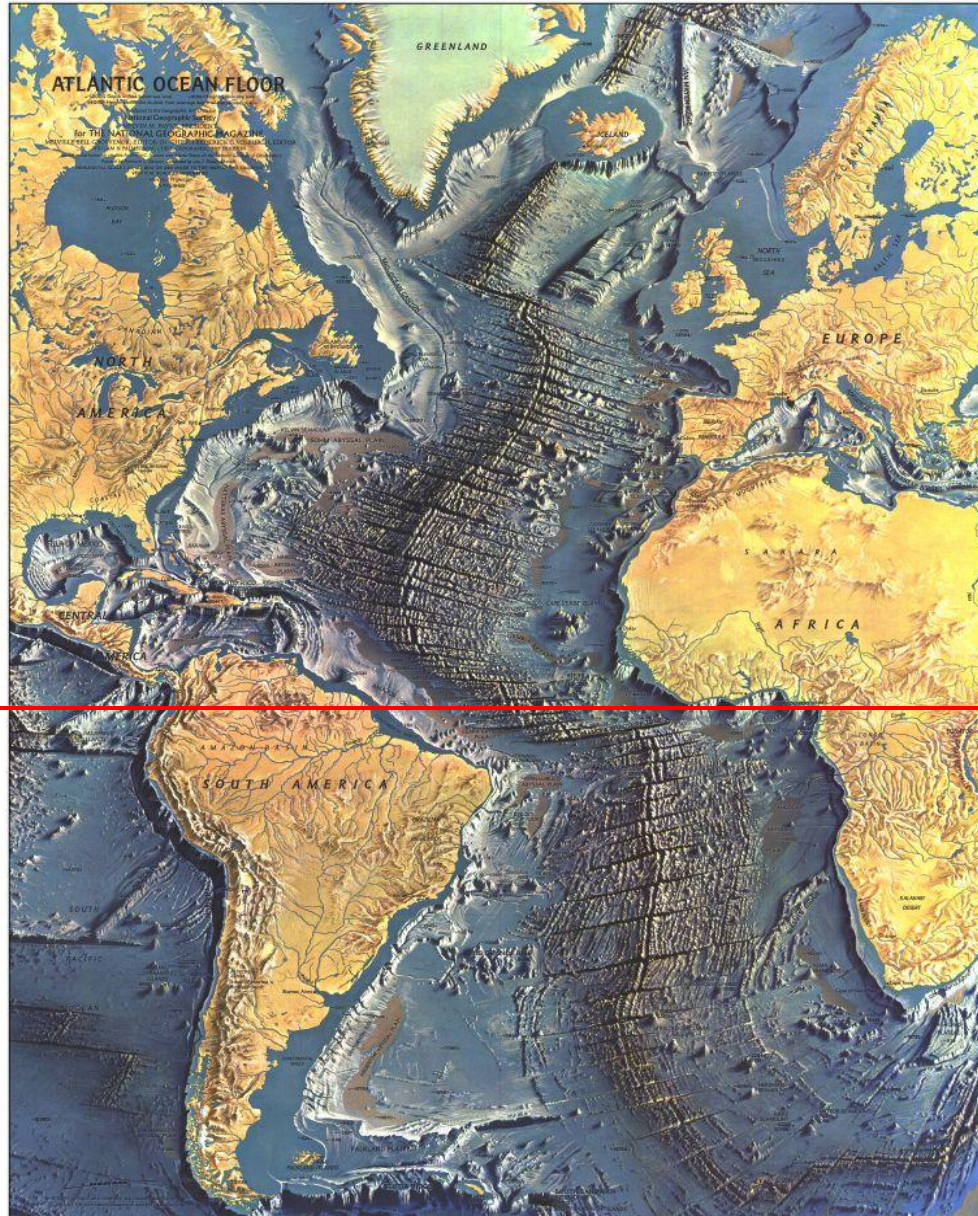
а



б

Действие силы Кориолиса на плиты литосферной оболочки, движущейся в широтном (а) и в долготном (б) направлениях, в северном и в южном полушариях

Карта дна Атлантического океана



$$F_k \propto 2[V \times \omega] = 2V\omega \sin(\varphi)$$

$$V = R(\omega_o - \omega_M) \cos(\varphi)$$

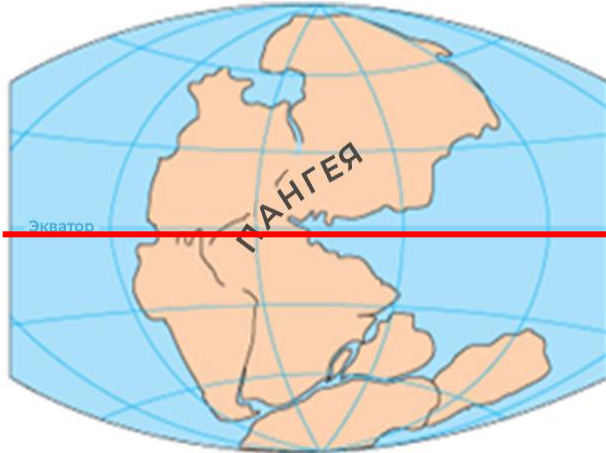
$$F_k \propto 2R\omega_M(\omega_o - \omega_M) \cos(\varphi) \sin(\varphi)$$

$$F_k(\varphi) = 0 \text{ при } \varphi = 0^\circ \text{ и } \pm 90^\circ$$

$$F_k(\varphi) = F_{k \max} \text{ при } \varphi = 45^\circ$$

Современное положение экватора

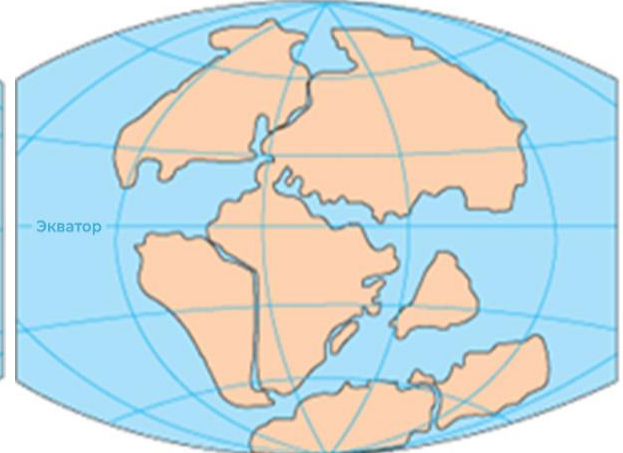
Схема распада суперконтинента Пангея



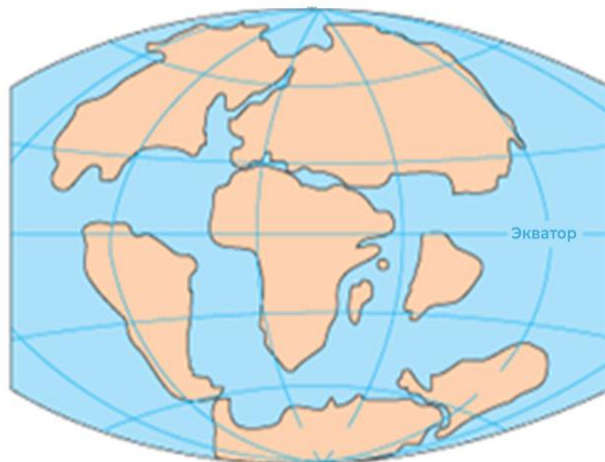
ПЕРМСКИЙ ПЕРИОД
250 млн лет назад



ТРИАСОВЫЙ ПЕРИОД
200 млн лет назад



ЮРСКИЙ ПЕРИОД
145 млн лет назад



МЕЛОВЫЙ ПЕРИОД
65 млн лет назад



НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Выводы

- ❖ Термин «Истинное полярное блуждание» следует относить не к оси вращения Земли, а к полюсу вращения ее литосферной оболочки (или части этой оболочки).
- ❖ Литосферная оболочка автономно вращается относительно мантии, меняя угловую скорость и полюс своего вращения под действием бомбардировок галактическими кометами.
- ❖ При TPW реконструкции движений плит решения этой задачи во многом зависит от надежности выбора системы отсчета, для которой по палеомагнитным данным рассчитывают траекторию движения полюса вращения.
- ❖ В новом подходе к интерпретации TPW феномена введены две системы отсчета. Одна отождествлена с вращением Земли (мантии), а вторая – с литосферной оболочкой. Первая система четко определена. Тогда как вторую обязательно следует выбирать с учетом действия силы Кориолиса на литосферные плиты.
- ❖ Учет силы Кориолиса позволяет более осознанно выбирать плиты, по которым можно определять траекторию «блуждания» полюса вращения литосферной оболочки, что позволяет повысить точность интерпретации TPW феномена.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!