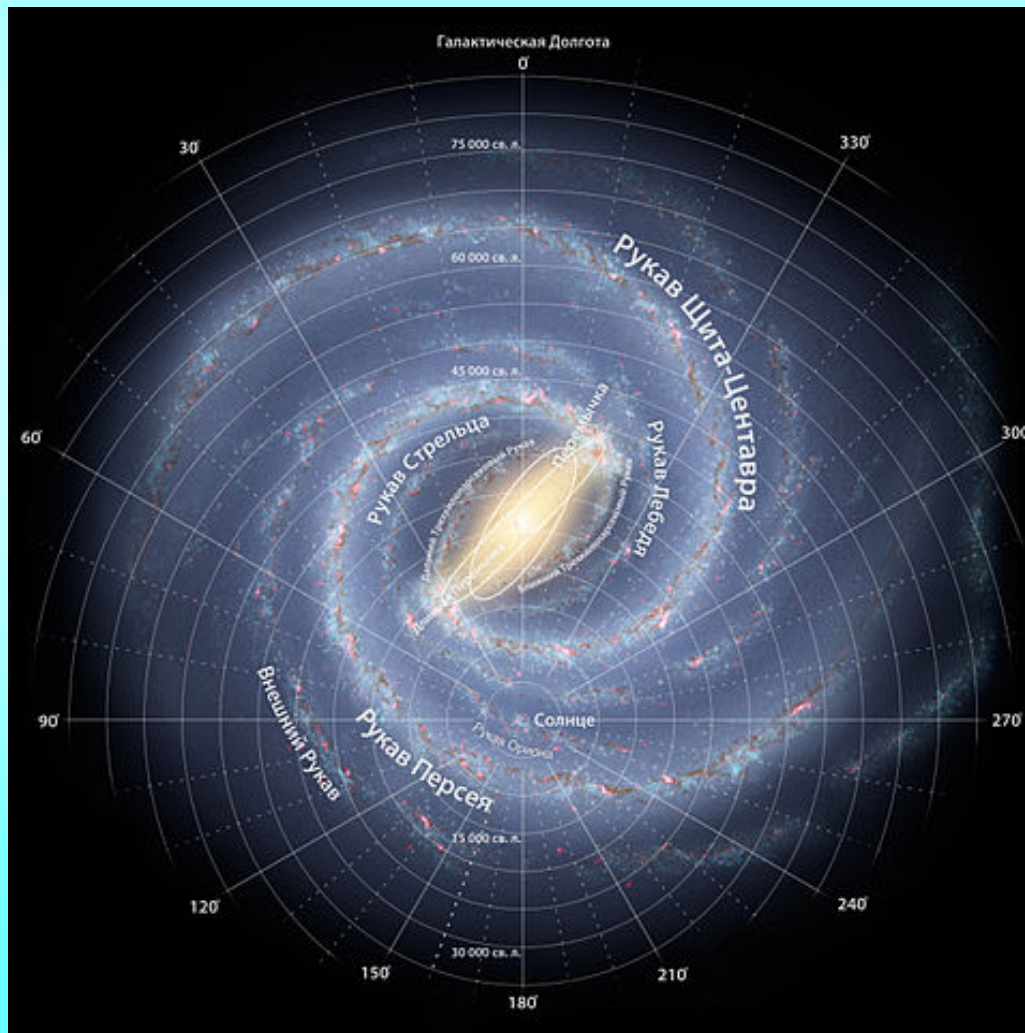
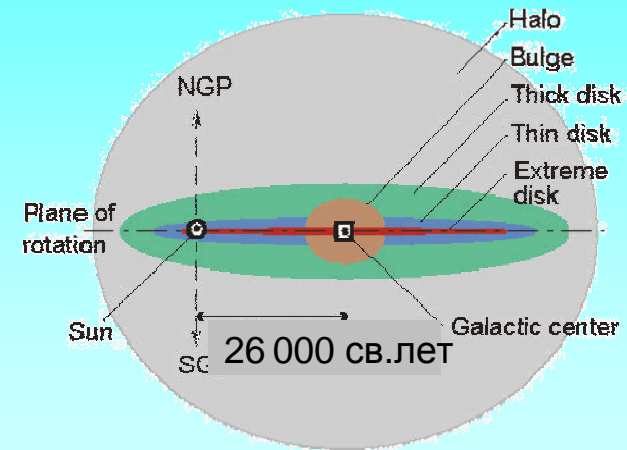
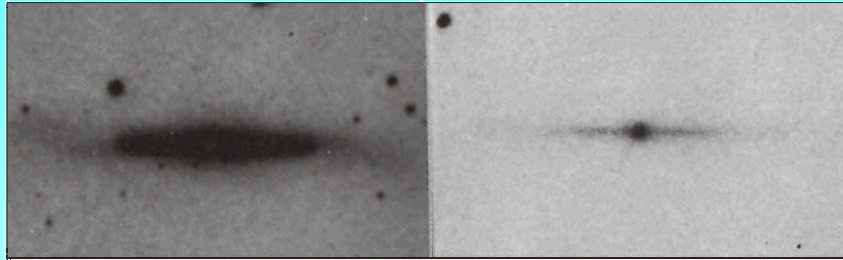


- Computer
- Krusader
- svk's Home
- Trash
- System
- Backups
- Docs
- Storage
- ProgArch

Магнетизм в космосе

Млечный путь



~200 (до 400) миллиардов звезд ($\approx 1\%$ наблюдаемо)

$D \approx 100\,000$ св.лет при толщине ~ 1000 св.лет

масса $\sim 3 \cdot 10^{12}$ масс Солнца;
чд $\sim 3 \cdot 10^6$ масс Солнца

Взрывы сверхновых

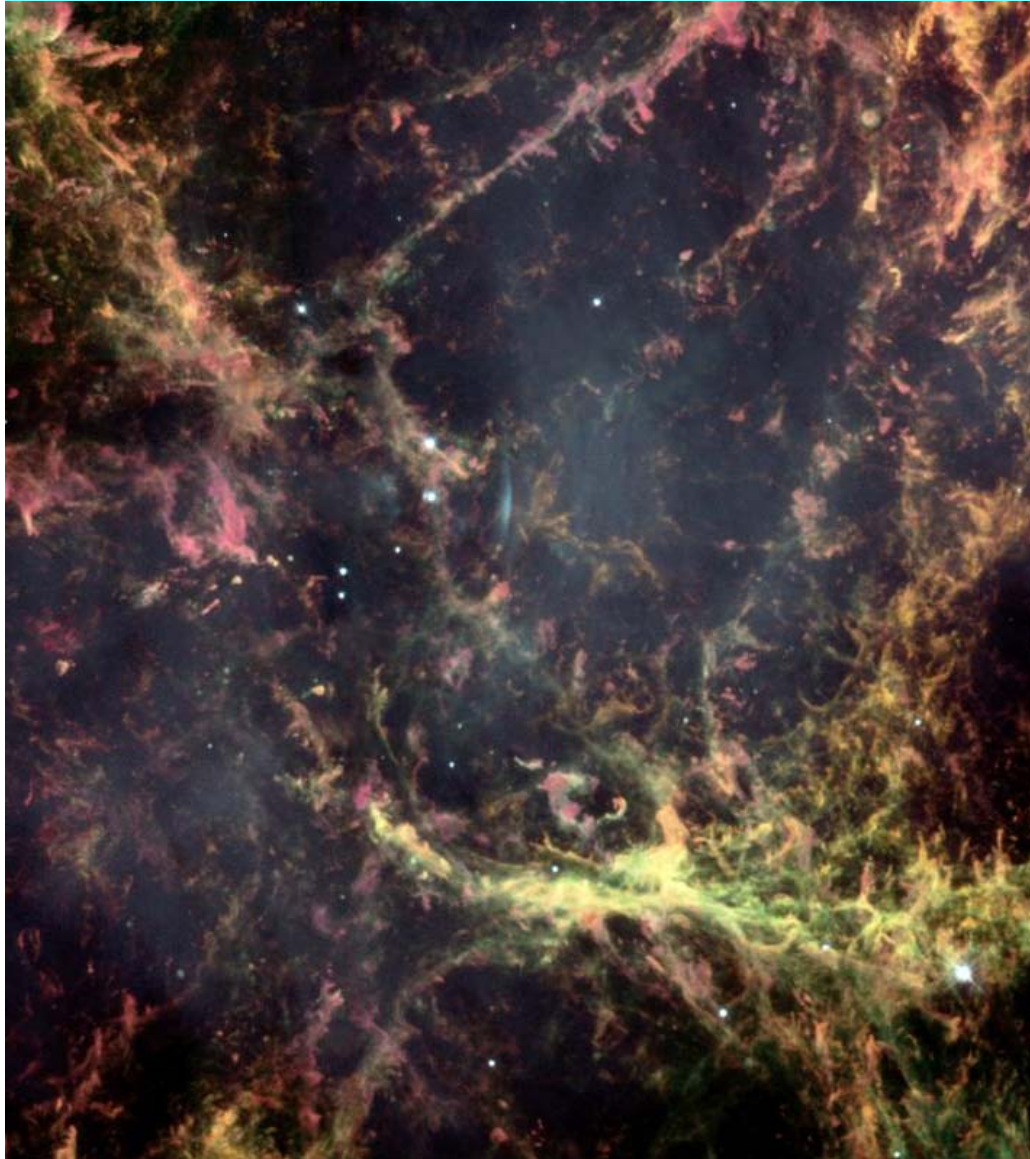
$M > 10^{31}$ кг -- характерна неустойчивость:
взрываются (тяжелые элементы в потоке n)

Юджин Паркер: "Если бы во Вселенной действовали только ядерные и гравитационные силы, то общая картина космической эволюции характеризовалась бы постепенной диссипацией тепловой энергии, лишь иногда нарушаемой взрывными событиями. Существует, однако, возмутитель космического спокойствия - магнитное поле".

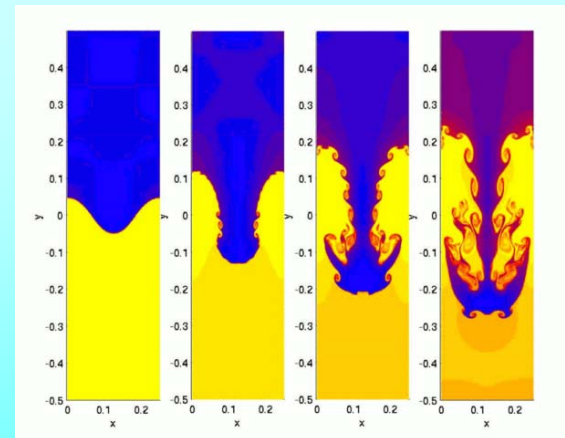
**Крабовидная
туманность**



Крабовидная туманность (фрагмент)



Снимок космического телескопа Хаббл небольшой области в Крабовидной туманности, показывающий **неустойчивости Рэля -- Тейлора** в сложной волокнистой структуре



Возникает между двумя контактирующими сплошными средами различной плотности

Магнитная гидродинамика

В ряде областей физики, механики, техники возникает необходимость изучения движений электропроводных жидкостей и газов. Если предметом изучения является газ, то свойством проводника электричества он обладает только тогда, когда находится в ионизованном состоянии.

Математическим аппаратом магнитной гидродинамики являются уравнения гидроаэромеханики и уравнения Максвелла для электромагнитных величин ...

Магнитная гидродинамика

Затухание тока зависит от проводимости σ и от плотности тока j . В объёме плазмы размером R время затухания тока равно

$$t_0 = \frac{4\pi\sigma}{c^2} R^2 .$$

За время $t \ll t_0$ затуханием поля можно пренебречь. Это значит, что магнитный поток за время t практически не меняется. Если контур за это время деформируется, то проходящий через него магнитный поток сохраняется.

Поведение поля при условии $t \ll t_0$ можно наглядно описать как **вмороженность силовых линий** в плазму.

Сила Лоренца в плазме

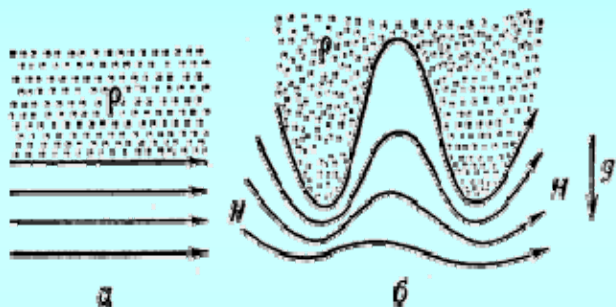
Всякие изменения конфигурации силовых линий приводят к изменению токов, текущих в среде.

Усреднённая сила Лоренца препятствует сжатию пучка силовых линий или их растяжению. Если в покоящейся проводящей среде имеется магнитное поле, то оно приведёт среду в движение, при котором силовые линии, движущиеся вместе со средой, будут распрямляться и расширяться.

При сжатии и искривлении силовых линий работа внешних сил, преодолевающих сопротивление поля, переходит в магнитную энергию. Движения среды, вызванные внешними причинами, могут существенно деформировать поле только в том случае, если их кинетическая энергия больше энергии магнитного поля.

Неустойчивость Рэля – Тейлора (магн.)

Неустойчивость Крускала-Шварцшильда - неустойчивость равновесия плазмы в однородном поле тяжести над областью пространства с продольным относительно границы плазмы магнитным полем



Незначительное искривление пограничных силовых линий магнитного поля будет сопровождаться стеканием плазмы под действием собств. веса вдоль силовых линий в местах их прогибания, поскольку поперек силовых линий плазма двигаться не может. В местах оттока плазмы силовые линии будут продолжать подниматься, а в местах ее накопления силовые линии будут продолжать опускаться.

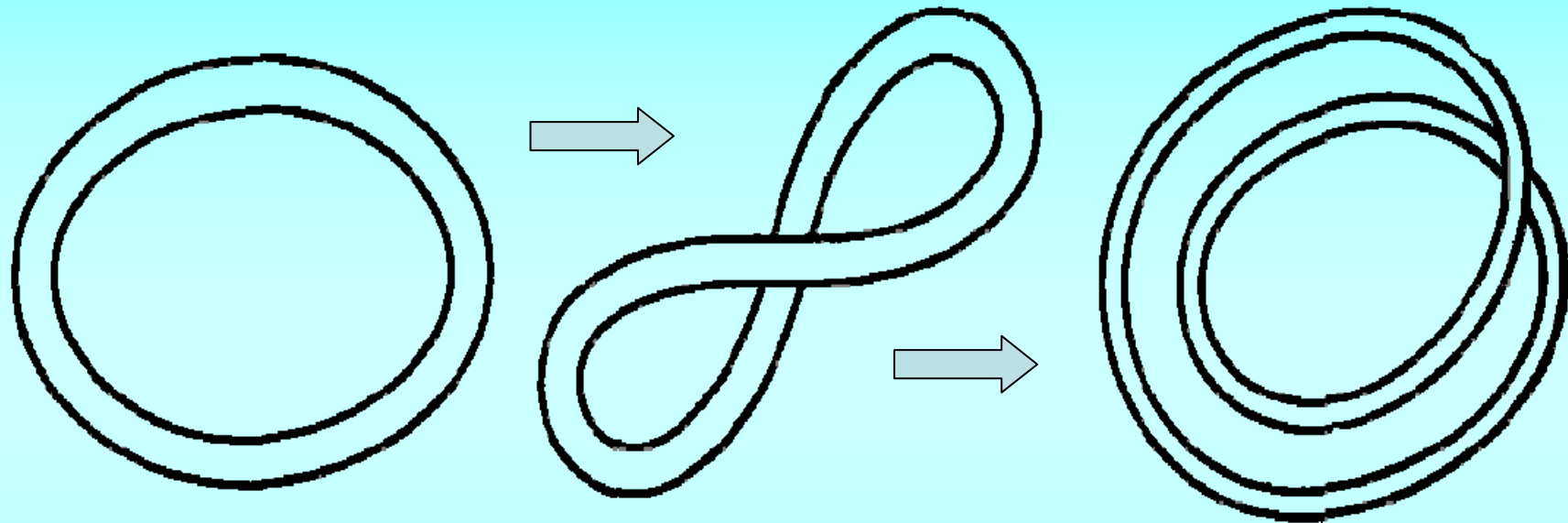
Равновесие газа в галактич. диске подобно равновесию плазмы, поддерживаемой магн. полем, и является неустойчивым. Возникновение незначительных флуктуаций плотности вещества сопровождается искривлением силовых линий, вдоль которых происходит стекание вещества в образовавшиеся в магнитном поле "долины". В результате возникают сгущения газа и пыли, формируются крупные газопылевые облака.

Неустойчивость Рэля - Тейлора

Заметную роль Р.-Т.н. должна играть при расширении остатков вспышек сверхновых звезд. На адиабатич. стадии расширения остатка сброшенная при вспышке оболочка сгребает окружающее вещество межзвездной среды. Вблизи контакта выброшенного вещества со сгребаемым газом образуется слой, в к-ром плотность вещества уменьшается наружу. В системе координат, связанной с веществом оболочки, эффективное ускорение направлено наружу. Следовательно, в указанном слое создаются условия, при которых более плотный газ находится над менее плотным. Наличие Р.-Т.н. способствует развитию в слое турбулентных движений, усиливающих магнитное поле.

Усиление поля

Используя понятие о вмороженности магнитного поля ...



Повторяя такие движения n раз, получим усиление в 2^n раз. Не отказываясь от идеальной вмороженности, можно получить неограниченное нарастание магнитного поля.

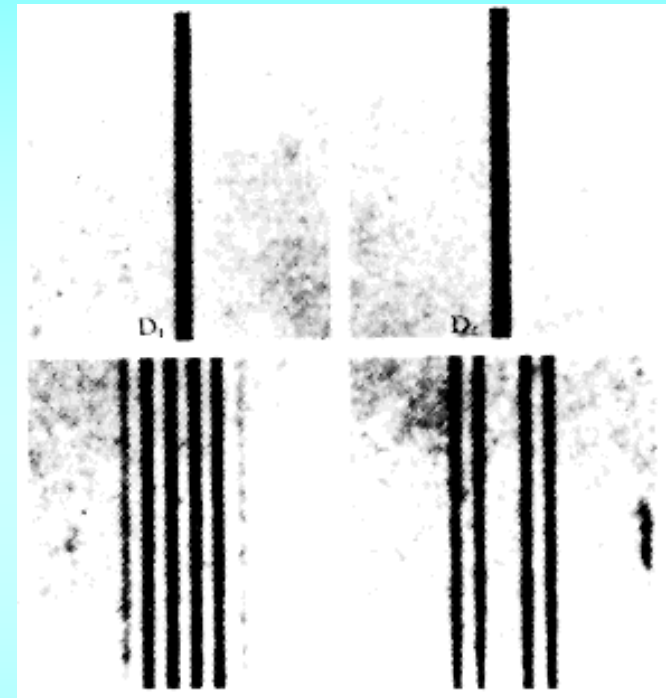
Ясно, что поле скоростей в этом примере не обладает цилиндрической симметрией.

Измерение магнитного поля

Атомы/молекулы в атмосфере звезды поглощают энергию на определенной частоте, производя характерные линии поглощения. В магнитном поле эти линии расщепляются. Поляризация излучения звезды зависит от ориентации магнитного поля. Таким образом, сила и направление магнитного поля звезды может быть определена путем изучения расщепления линий (**эффект Зеемана**, 1896 г.).

На солнце: G. E. Hale, 1908.

Спектрополяриметр (сочетание спектрографа с поляриметром) используется для измерений магнитного поля (≥ 1949).



Измерение магнитного поля

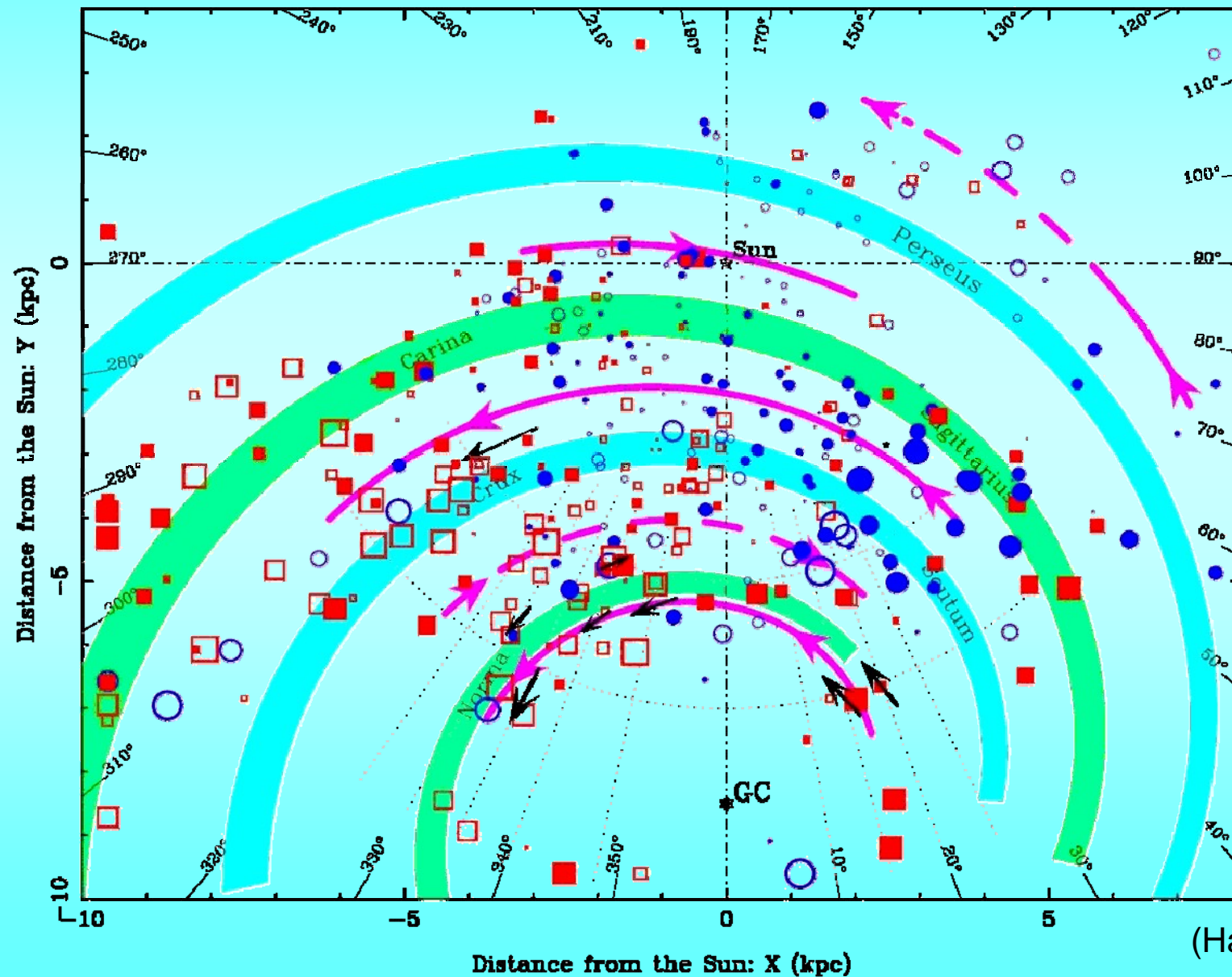
- Развитие радиоастрономии
- Приборы с зарядовой связью
- Внеземные обсерватории
- Вращение плоскости поляризации внегалактического излучения

$$\alpha \sim \int_{\text{источник}}^{\text{солнце}} n_e \cdot \bar{B} \cdot d\bar{l}$$

- Пульсары

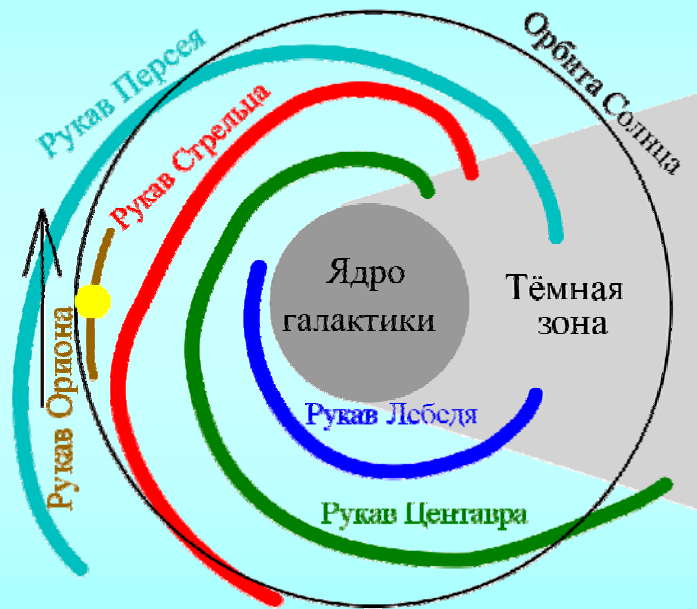
Магнитные поля нашей галактики

по данным вращения плоскости поляризации излучения пульсаров



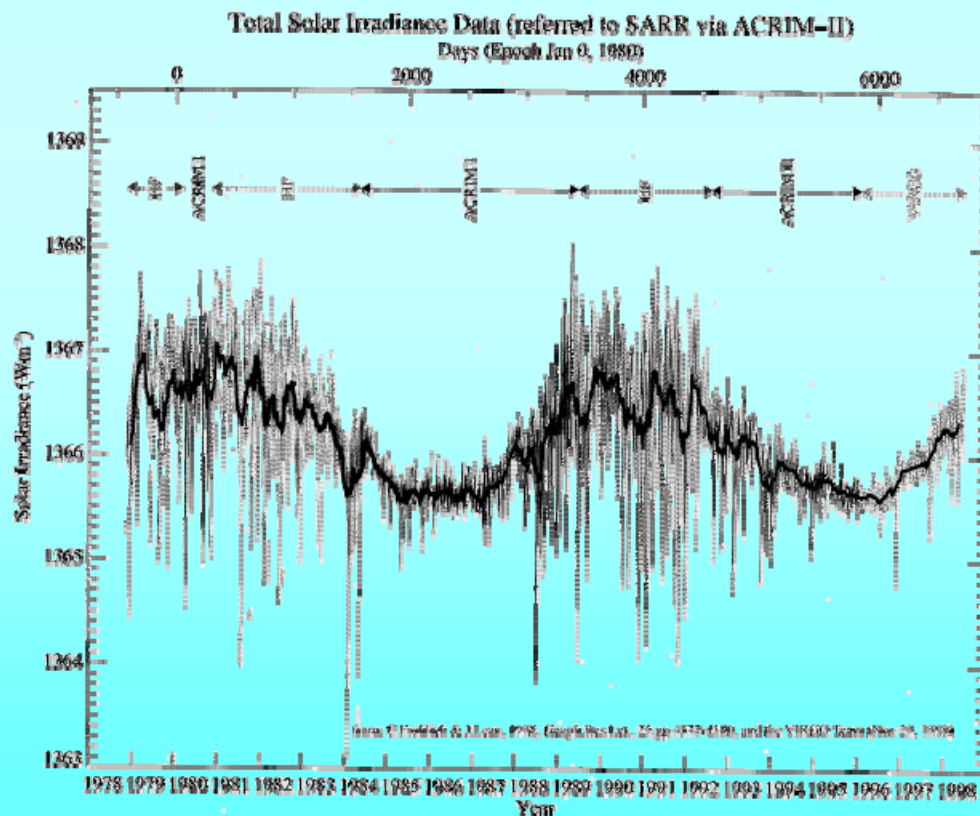
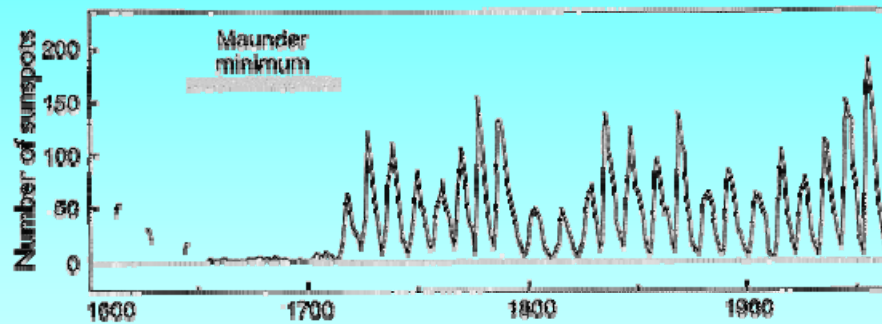
(Han, 2003)

Магнитная стабилизация



Магнитное поле в спиральных рукавах Галактики направлено приблизительно вдоль рукавов и равно $H \approx (2-3) \cdot 10^{-6}$ Э. Давление поля в направлении, перпендикулярном силовым линиям, оказывается достаточным, чтобы уравновесить силу тяжести, действующую на газ. Это не позволяет межзвёздному газу стечь к плоскости Галактики и быстро сконденсироваться в звёзды. Можно сказать, что межзвёздный газ сохранился благодаря тому, что в нём есть магнитное поле.

Солнечная активность



Солнечная активность проявляется такими явлениями, как солнечные пятна, факелы, вспышки, корональные выбросы массы. Их количество и частота появления изменяются со временем. В белом свете в максимуме активности увеличивается количество солнечных пятен, в свете линий излучения водорода появляются площадки увеличенной эмиссии.

Переменность светимости Солнца имеет разные временные масштабы: от вековых изменений до флуктуаций отдельных параметров на шкале времени - минуты и часы. Наиболее известной шкалой солнечной переменности является **11-летний цикл** солнечной активности.

Магнитное поле и солнечная активность

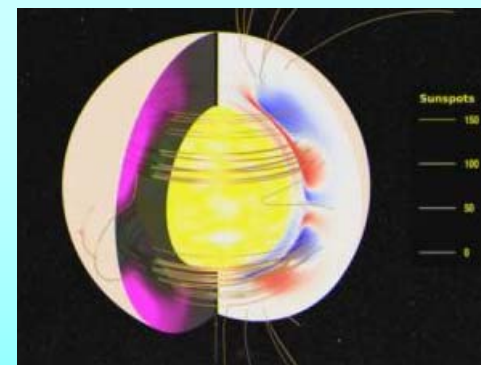
В основе механизма генерации магнитных полей лежат конвективные и турбулентные движения плазмы. Для действия динамо необходимо два условия: вращение и наличие достаточно глубокой конвективной зоны.

Энергия, выделяющаяся внутри Солнца, вызывает конвективные турбулентные движения в его внутренних слоях. Магнитные поля, увлекаемые движением проводящей жидкости, растягиваются и изгибаются, приобретая энергию. Конвективные и турбулентные потоки плазмы действуют подобно динамо-машине, преобразуя механическую энергию в энергию магнитного поля. Соответственно, мы наблюдаем непрерывно изменяющуюся структуру магнитного поля на его поверхности.

Солнечное динамо

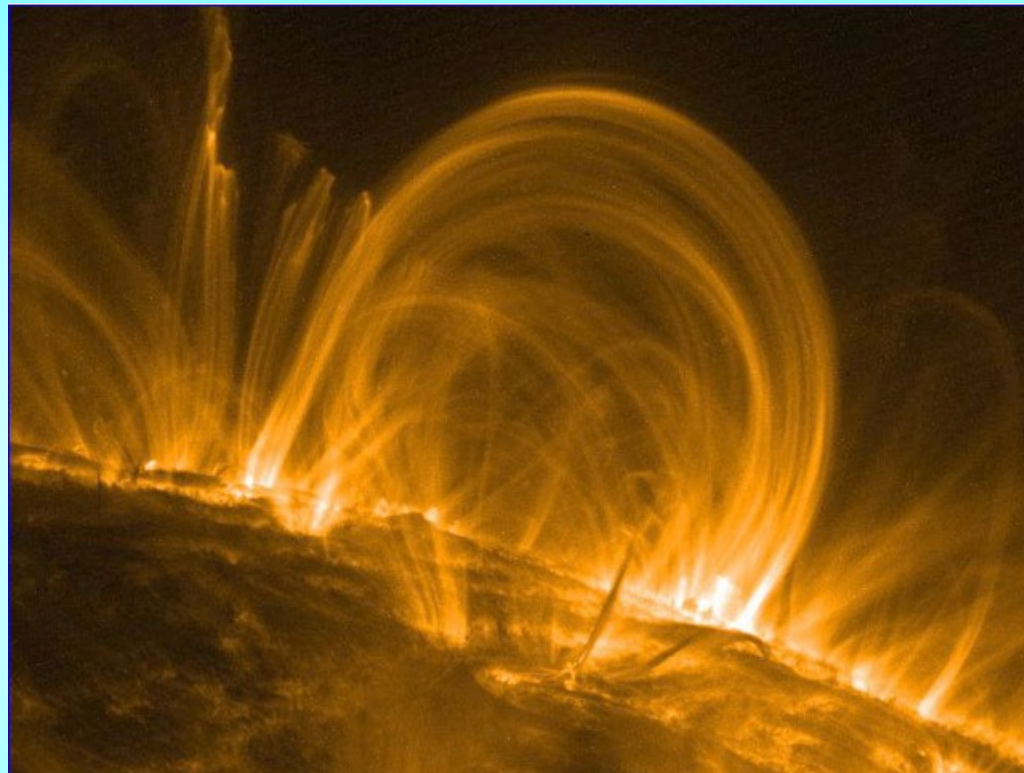
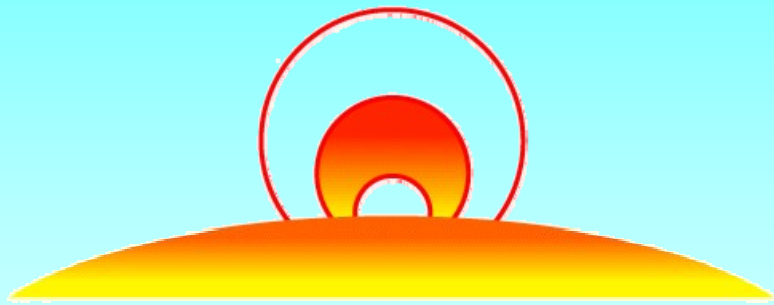
В начале 11-летнего солнечного цикла крупномасштабное солнечное магнитное поле направлено преимущественно вдоль меридианов («полоидальное») и имеет приблизительно дипольную конфигурацию. В максимуме цикла оно сменяется направленным приблизительно вдоль параллелей («тороидальное») магнитным полем солнечных пятен, которое в конце цикла вновь сменяется полоидальным -- при этом его направление противоположно тому, что наблюдалась 11 лет назад.

Из-за того, что экваториальные области вращаются быстрее, чем полярные («дифференциальность вращения»), изначально полоидальное поле, увлекаясь вращающейся плазмой, должно растягиваться вдоль параллелей, приобретая тем самым тороидальную компоненту. Юджин Паркер (1955) показал, что поднимающиеся объёмы солнечной плазмы должны вращаться за счёт сил Кориолиса, и увлекаемые ими тороидальные магнитные поля могут преобразовываться в полоидальные.



Модель солнечного динамо

Визуализация магнитного поля



Вид сверху...



Магнетизм ...
и движение континентов

Совмещение границ приатлантических континентов



Неслучайность этого сходства отмечал еще английский философ Ф. Бэкон («Новый Органон», 1620), а Пласе (1658) высказывал предположение, что Старый и Новый Свет разделились в результате всемирного потопа.

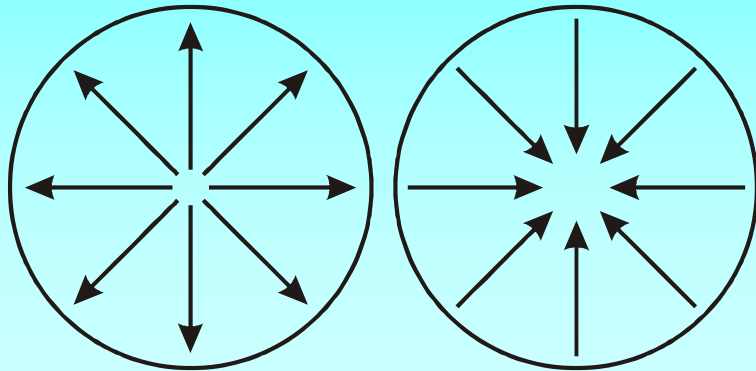
Дрейф континентов

Наибольшую популярность идея о движении континентов приобрела в результате работ геофизика Вегенера (1912, 1915). Исходя из сходства контуров берегов, геологического строения и верхнепалеозойской флоры и фауны приатлантических континентов, особенно Африки и Южной Америки, а также из распространения на всех материках следов пермокарбонического оледенения, Вегенер предложил реконструкцию Пангеи и процесса ее распада.

Непринципиальные ошибки в деталях, обнаруженные придирчивыми критиками в работах Вегенера и его последователей, заслонили от большинства геологов достоинства его идей и концепция движения континентов считалась несостоятельной, пока не возродилась в 60-х годах XX столетия под давлением независимых палеомагнетных исследований.

Дрейф континентов

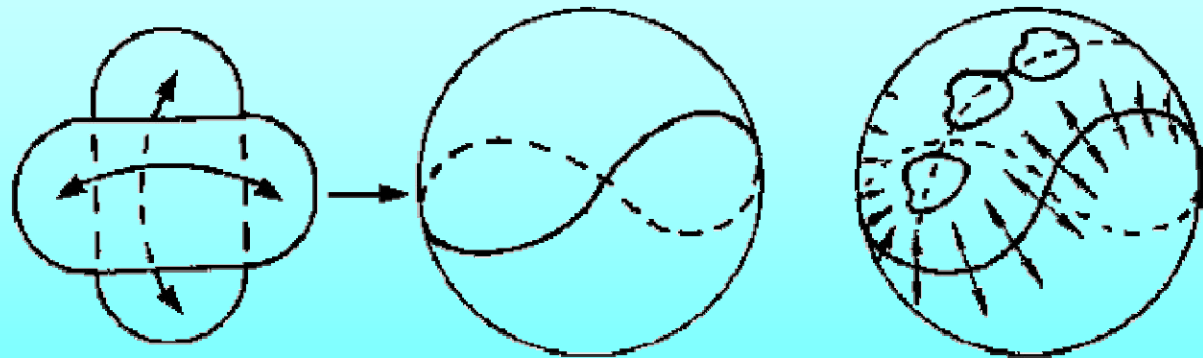
Одноячеистая конвекция



Наиболее простой, будет единственная ячейка, охватывающая собою всю мантию, с одним полюсом подъема вещества и одним же полюсом его опускания. В этом случае континенты собираются воедино вокруг полюса опускания, освобождая вокруг полюса подъема “пустое” – океаническое – полушарие; такая ситуация существовала, например, во времена Пангеи.

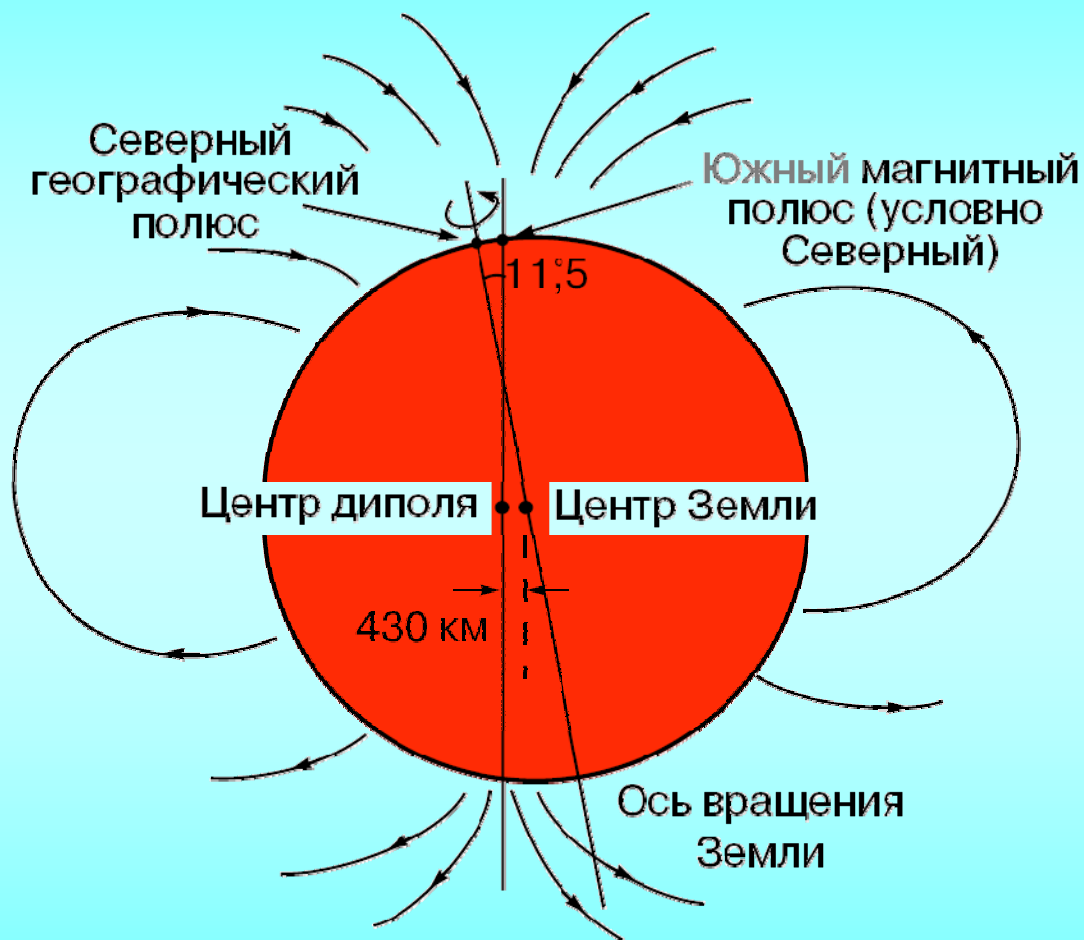
В области длинных “меридианов” образуется застойная область, в которой вещество постепенно оказывается тяжелее окружающей его среды. Через некоторое время оно проваливается вглубь мантии, создавая второй полюс опускания, и превращая конвекцию в двухъячеистую.

Вторая схема конвекционного процесса в мантии



Африка, Евразия, Австралия – Северная и Южная Америка, Антарктида

Магнитное поле Земли



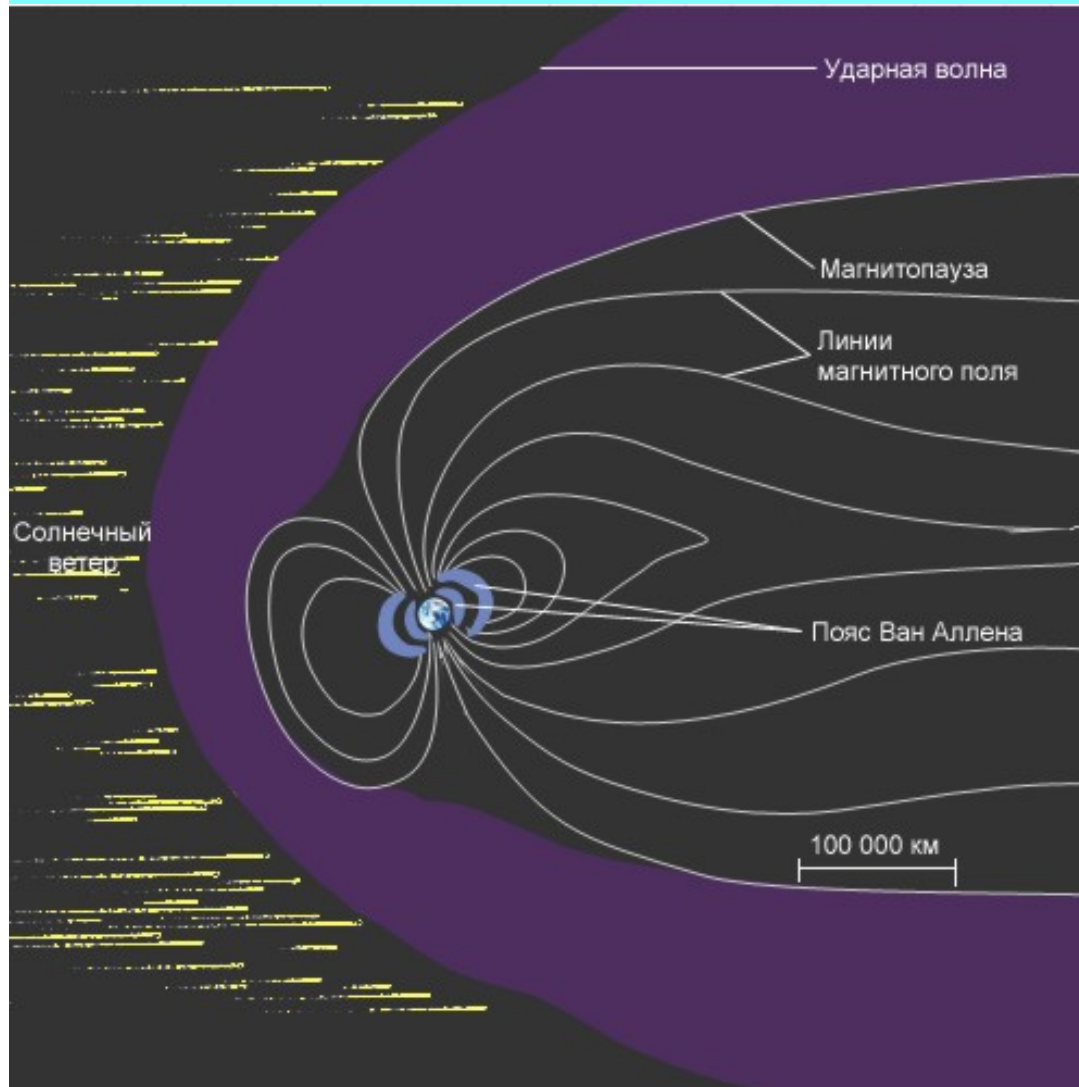
Магнитное поле Земли похоже на поле однородной намагниченной сферы с магнитной осью, наклоненной на $11,5^\circ$ к оси вращения Земли.

Напряженность магнитного поля на полюсах составляет $0,63 \text{ Э}$, на экваторе – $0,31 \text{ Э}$.

16 инверсий магнитных полюсов с северного на южный и обратно за последние 10 миллионов лет.

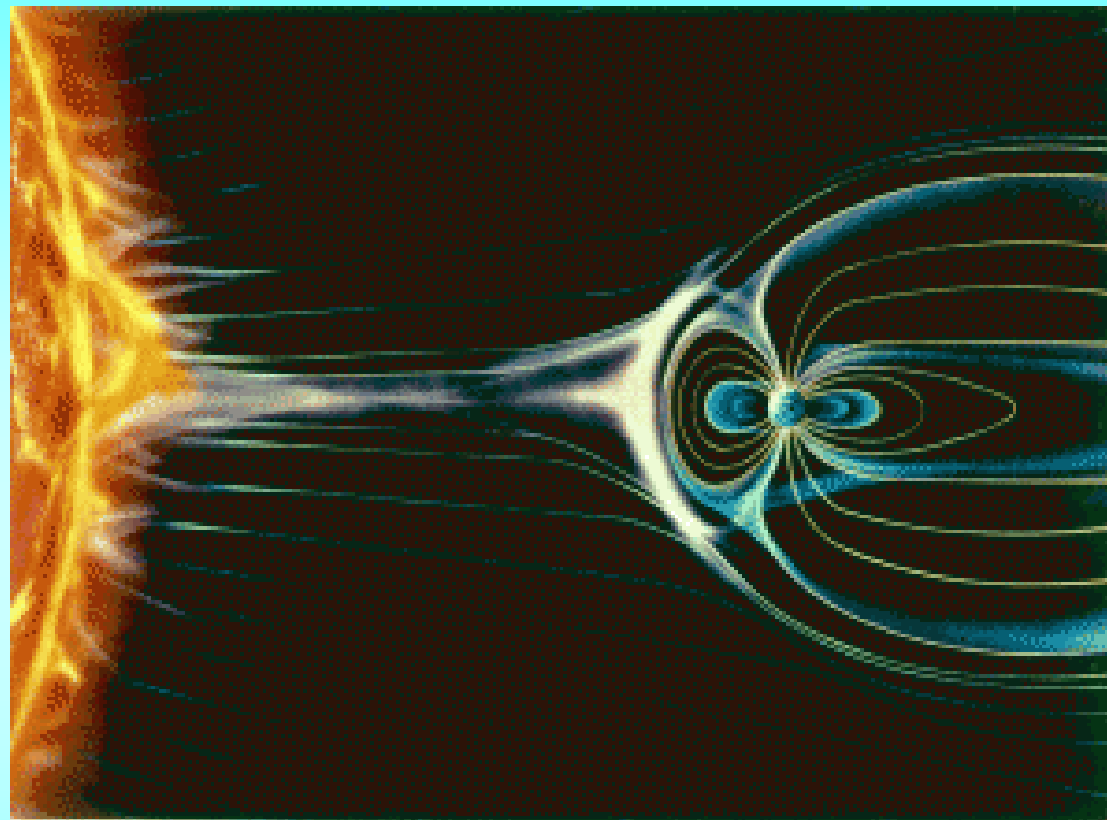
Северный магнитный полюс расположен на юге, в Антарктиде, а Южный - на севере, в Канаде.

Магнитное поле Земли.



- Главное магнитное поле и его вековые вариации (источники в ядре Земли)
- Аномальное магнитное поле (источники в земной коре)
- Электромагнитное поле (внешнее, источники в околоземном пространстве)

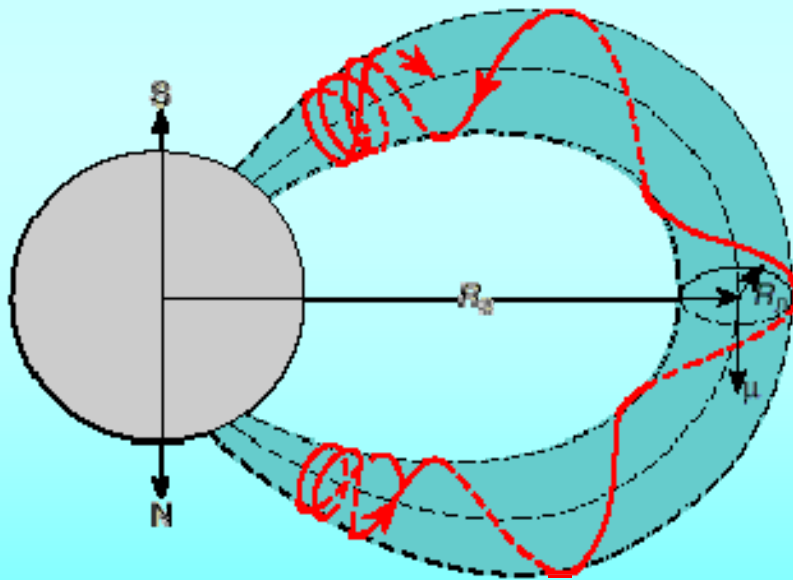
Солнечный ветер и ...



- это поток ионизованных частиц, выбрасываемых из солнечной короны во всех направлениях со скоростью нескольких 100 км в секунду. Солнечный ветер не однороден. Его скорость является высокой (800 км/с) над корональными дырами и низкой (300 км/с) над стримерами.

... и эффект магнитного удержания

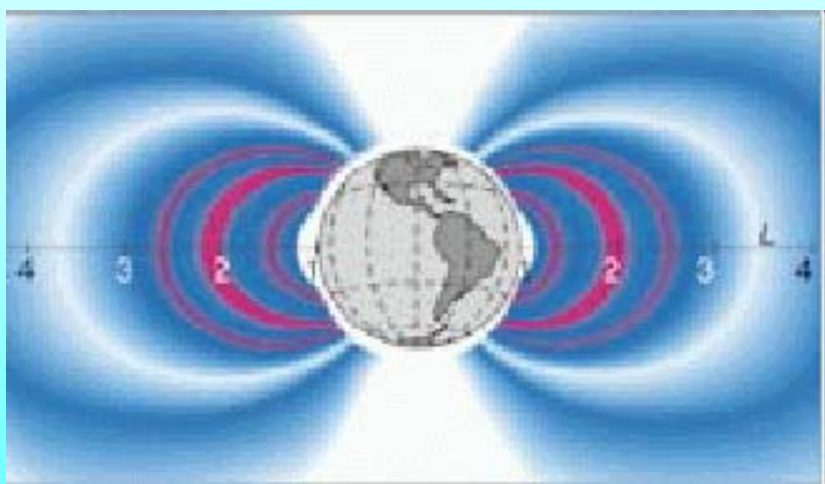
в любом дипольном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией E , меньше критической. Те же частицы с энергией $E < E_{кр}$, которые все-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещённые области магнитосферы называются зонами захвата.



Движение частицы может быть представлено как ларморовское вращение вокруг магнитной силовой линии (центр вращения частицы в магнитном поле называют ведущим центром) и поступательное (движение центра вращения вдоль магнитной силовой линии). В результате сложения этих составляющих частица движется по спиральной траектории, навиваясь на магнитные силовые линии, и, если эти магнитные линии замкнутые, возникает эффект магнитного удержания

Радиационные пояса Земли

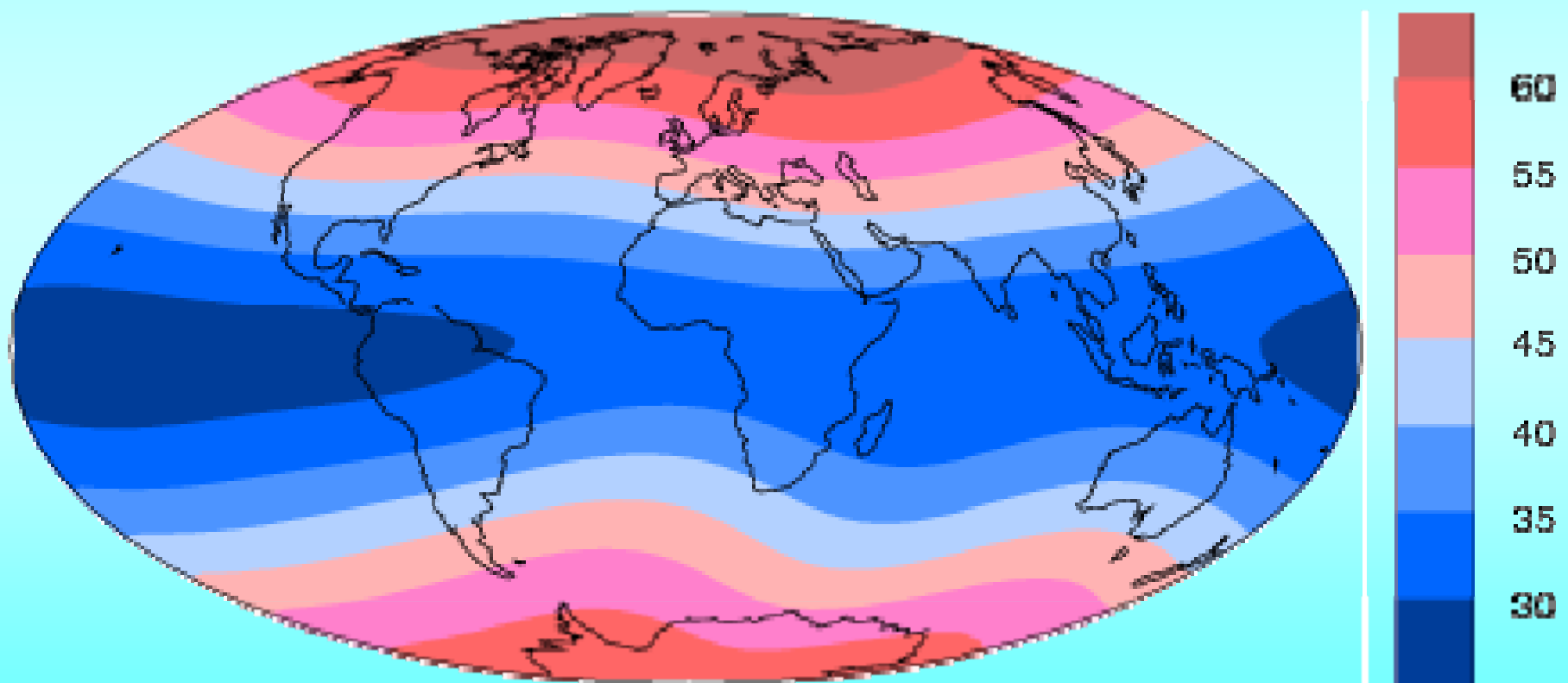
Радиационный пояс Земли (внутренний) был открыт американским учёным (Джеймсом ван Алленом) после полета Эксплорера-1 и советскими учёными (Вернов и Чудаков) после полёта Спутника-3 (внешний пояс) в 1958 году и представляет собой, в первом приближении, тороид, в котором выделяется две области: внутренний радиационный пояс на высоте ~ 4000 км, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ; внешний радиационный пояс на высоте ~ 17 000 км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.



Оболочки $L = 1-3$ - внутренняя часть пояса; $L = 3,5-7$ - внешняя часть;
* $L = 1,2-1,5$ - стабильный пояс высокоэнергетичных электронов
* $L \sim 2$ - стабильный пояс ядер
* $L \sim 2,6$ - квазистабильный пояс
* большие L -- радиация полярных сияний



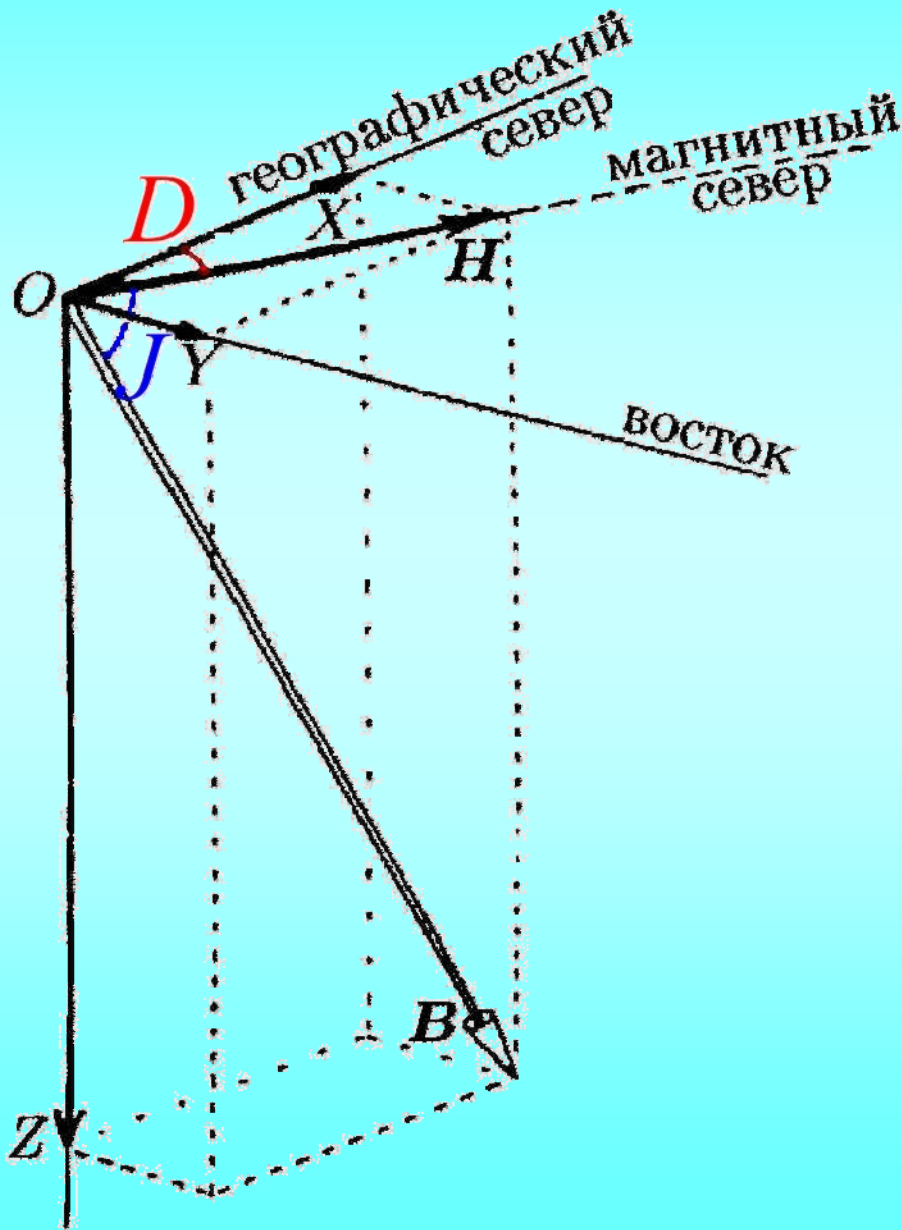
Главное магнитное поле



Усредненное по времени главное геомагнитное поле

H, [A/m]

Основные характеристики



магнитная индукция:

$$B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

угол магнитного склонения:

$$\operatorname{tg} D = \frac{Y}{X}$$

угол магнитного наклонения

$$\operatorname{tg} J = \frac{Z}{H} = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$B = \frac{X}{\cos D \cos J}$$

Временные изменения

Поле диполя описывает около 80% изменчивости.

Недипольная часть главного поля дрейфует на запад. В среднем скорость западного дрейфа равна $\sim 0,2^\circ$ в год. Полный оборот недипольного поля вокруг оси вращения Земли может произойти за 1800 лет. Предполагается, что

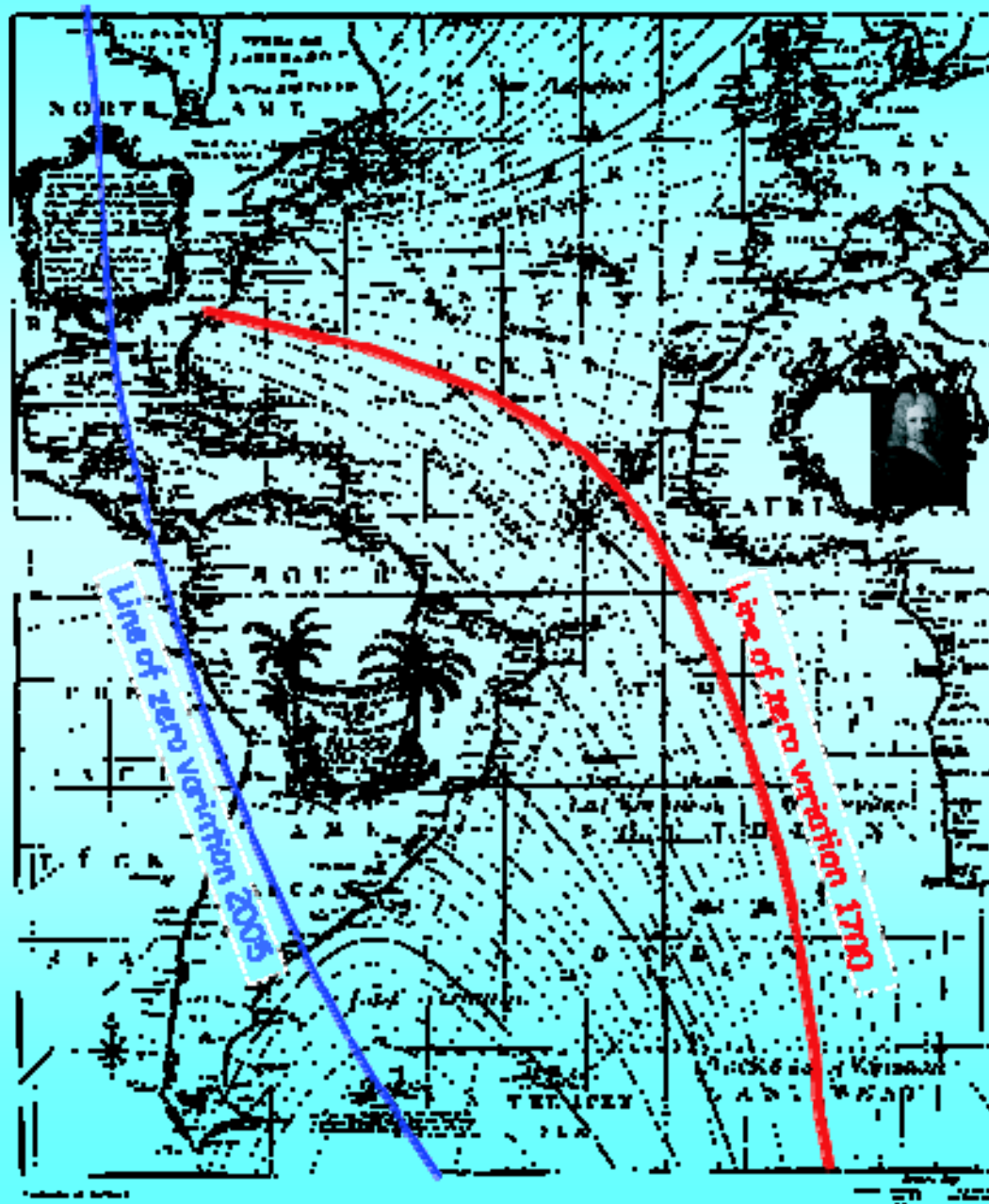
Спектр вековых вариаций

Период, лет	Амплитуда, нТл	Характер
8000	$25 \cdot 10^3$	глобальный
100	$4-6 \cdot 10^3$	глобальный
1200	$4 \cdot 10^3$	глобальный + региональный
900	$4 \cdot 10^3$	глобальный + региональный
600	$4 \cdot 10^3$	региональный + глобальный
360	$2 \cdot 10^3$	региональный + глобальный
60	$5 \cdot 10^2$	региональный

физическим механизмом западного дрейфа является более высокая угловая скорость вращения мантии Земли по сравнению с внешним ядром.

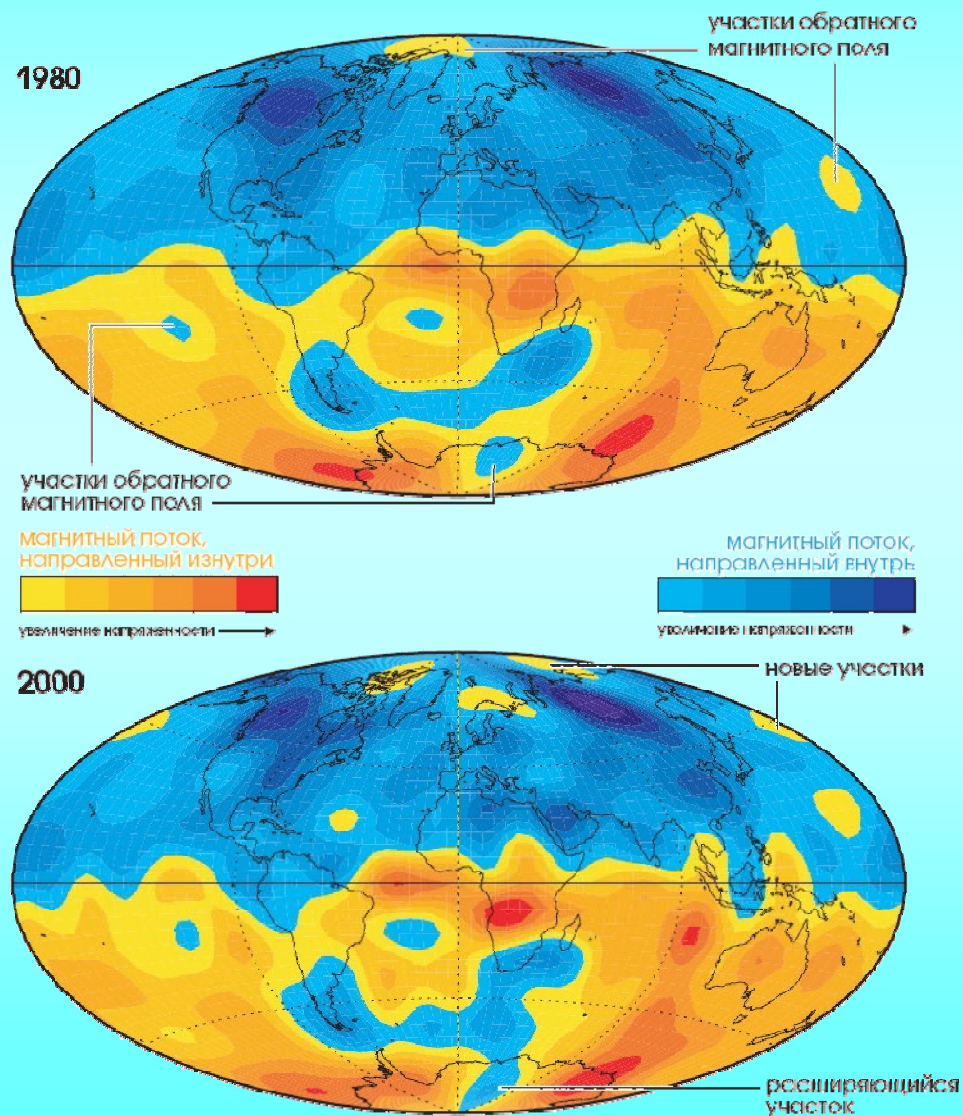
Западный дрейф вносит существенный вклад в вековые вариации, но не объясняет их полностью. Существуют вековые вариации и дипольной части поля с характерным временем порядка 8000 лет. Наиболее сильным изменениям с течением времени подвержена вертикальная составляющая поля.

Временные изменения



Карта магнитного
склонения
линии нулевого
магнитного склонения
Эдмон Галлей (1701)

Геомагнитный мониторинг на границе ядро-мантия



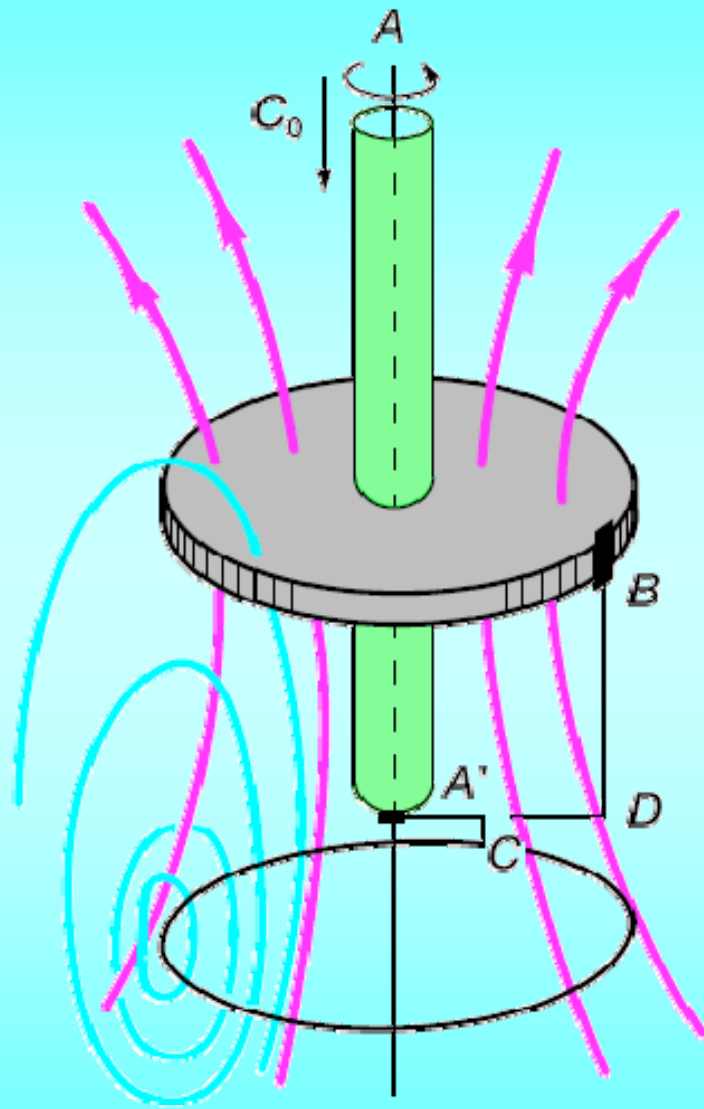
Контурные карты магнитного поля Земли на границе ядро–мантия ($T \sim 5000\text{K}$), составленные по измерениям, сделанным со спутников, показывают, что большая часть магнитного потока направлена от центра Земли в Южном полушарии и к центру в Северном. Но в некоторых районах складывается обратная картина. Участки обратного магнитного поля росли в числе и размерах между 1980 и 2000 г.

Природа главного поля

Почти общепризнанной является гипотеза магнитного гидродинамо, основанная на признании существования токопроводящего жидкого внешнего ядра. Тепловая конвекция, то есть перемешивание вещества во внешнем ядре, способствует образованию тороидальных электрических токов в ядре. Благодаря взаимодействию тороидальных электрических полей с конвективными течениями во внешнем ядре возникает суммарное магнитное поле дипольного характера, ось которого примерно совпадает с осью вращения Земли.

Для “запуска” подобного процесса необходимо начальное, хотя бы очень слабое, магнитное поле, которое может генерироваться гиромагнитным эффектом, когда вращающееся тело намагничивается в направлении оси его вращения.

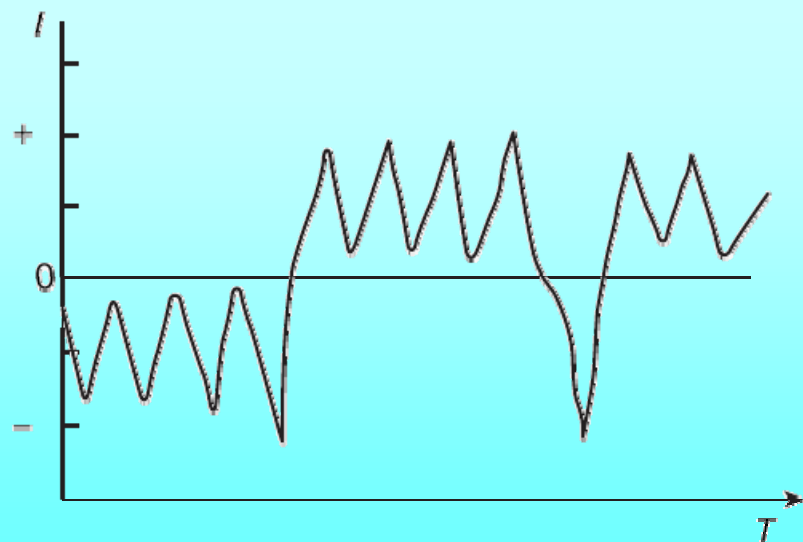
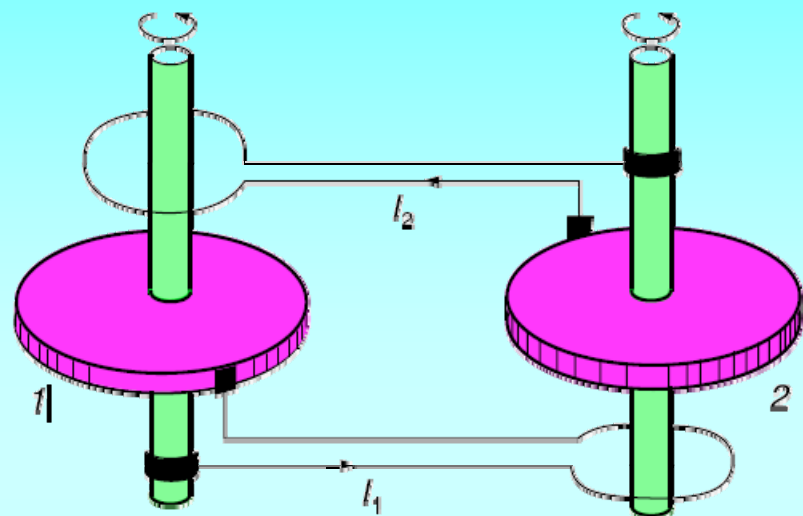
Магнитное геодинамо



Сила Кориолиса закручивает поднимающуюся жидкую массу в спираль.

В первоначальном слабом магнитном поле (красные линии), направленном примерно вдоль оси, вращается проводящий диск. Между щеткой и осью вращения согласно закону индукции Фарадея, образуется разность потенциалов, что вызывает электрический ток в цепи. Возникшее при этом магнитное поле (синие линии) будет его усиливать, и тем больше, чем быстрее вращение.

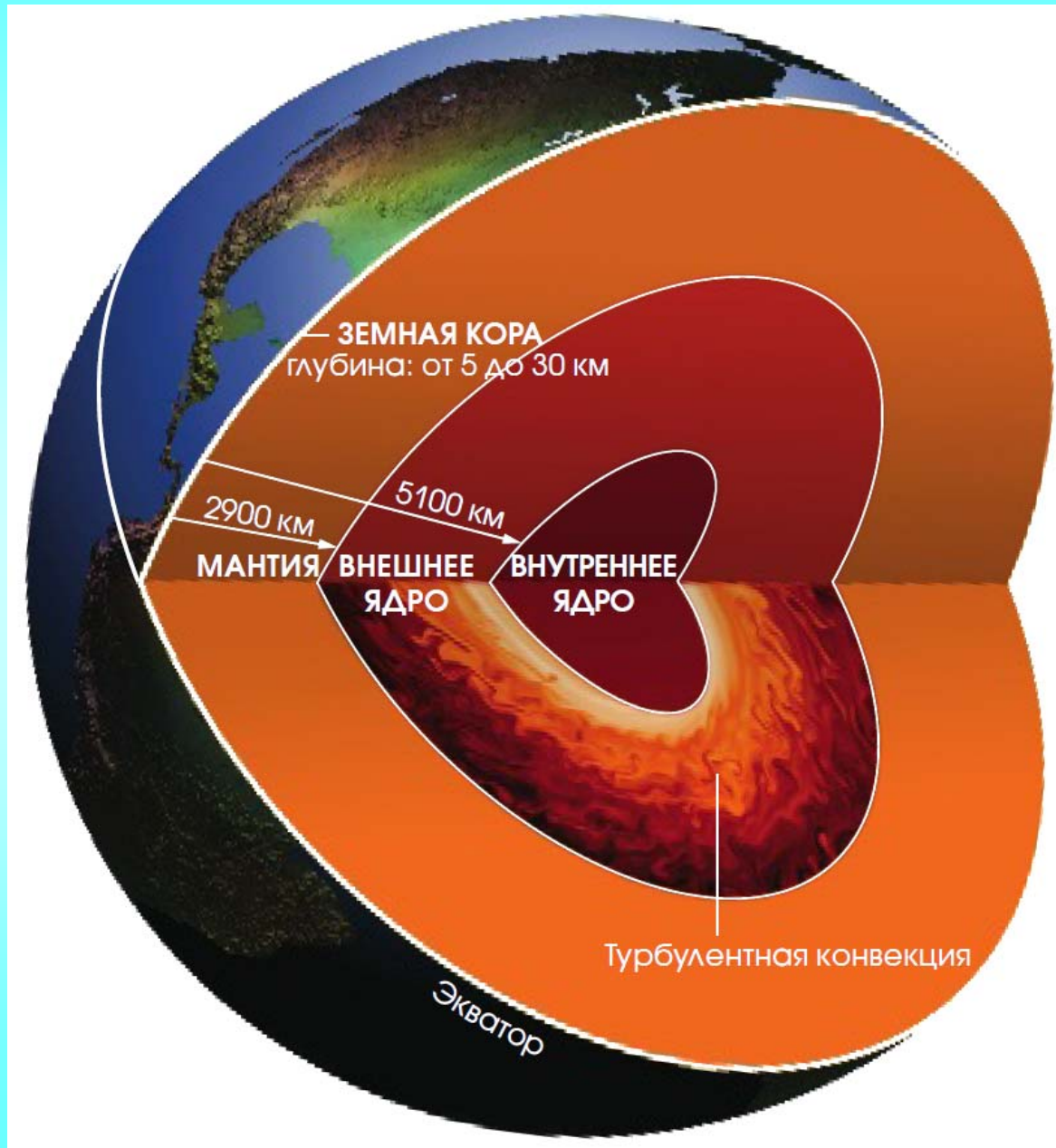
Двухдисковое динамо



В 60-х годах XX века японский геофизик Рикитаки предположил, что каждую конвективную ячейку или вихрь в жидком внешнем ядре можно считать одним диском динамо. Модель простейшего двухдискового динамо показывает, что ток I_1 от диска 1 перетекает в диск 2, генерируя магнитное поле. Ток I_2 , в свою очередь, усиливает магнитное поле около диска 1.

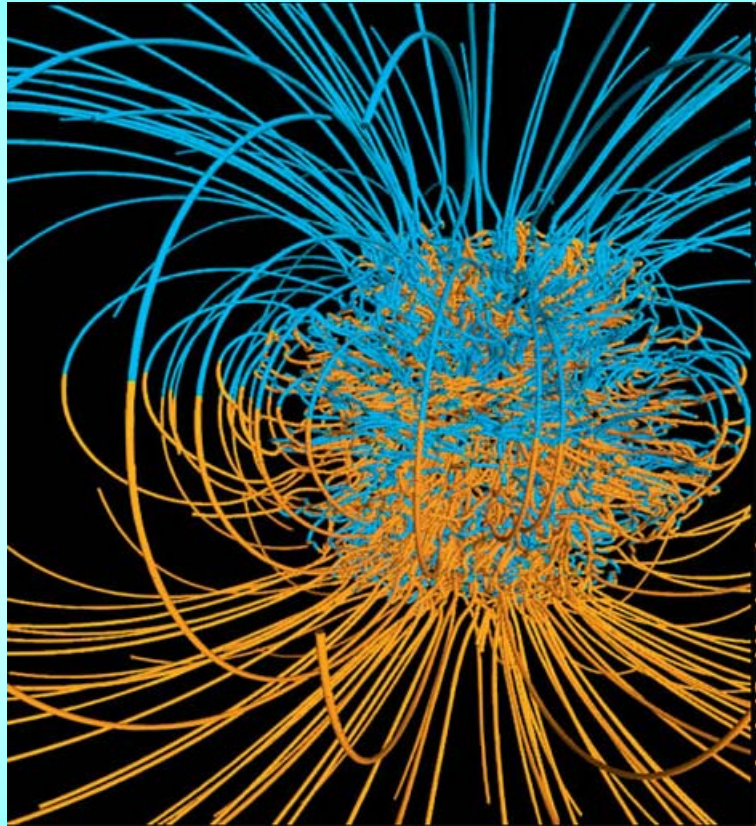
Токи, а следовательно, и магнитные поля колеблются сначала около некоторого стационарного состояния, а затем, увеличивая амплитуду, внезапно начинают испытывать колебания уже вокруг другого стационарного состояния.

Модель главного поля



Во внутреннем строении Земли выделяется расплавленное внешнее ядро, где сложная турбулентная конвекция генерирует геомагнитное поле.

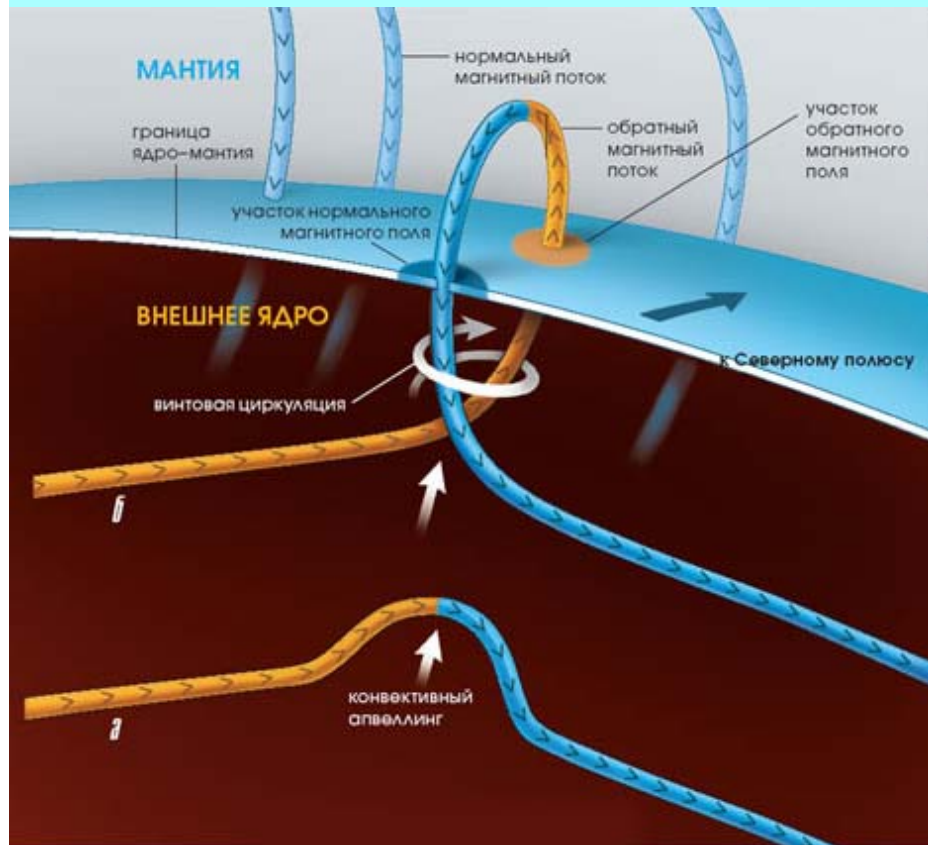
Модель главного поля



Магнитные силовые линии, созданные на компьютерной модели геодинамо, показывают, насколько структура магнитного поля Земли проще за ее пределами, чем внутри ядра (спутанные трубочки в центре). На поверхности Земли большая часть линий магнитного поля выходит изнутри (длинные желтые трубочки) у Южного полюса и входит внутрь (длинные голубые трубочки) около Северного.

Хотя геодинамо продуцирует очень сильное магнитное поле, только 1% его энергии распространяется за пределами ядра. Общая конфигурация магнитного поля, измеренного на поверхности, имеет характер диполя, который большую часть времени ориентирован по земной оси вращения.

Образование участков обратного магнитного поля



Они появляются, когда поднимающаяся жидкая масса проталкивает горизонтальные магнитные линии вверх в расплавленном внешнем ядре. Такое конвективное излияние иногда закручивает и выдавливает магнитную линию (а). Одновременно силы вращения Земли вызывают винтовую циркуляцию расплава, которая может затянуть петлю на выдавленной магнитной линии (б). Когда выталкивающая сила достаточно велика, чтобы выбросить петлю из ядра, на границе ядро-мантия образуется участок обратного магнитного потока.

Аномальное геомагнитное поле

Горные породы, расположенные в верхних частях литосферы и на земной поверхности, намагничиваются в главном геомагнитном поле. Это намагничивание достаточно сильно из-за присутствия в породах ферромагнитных минералов, наиболее сильномагнитным из которых является магнетит (Fe_3O_4). Вследствие намагничивания породы создают собственное аномальное поле \mathbf{B}_a , или поле магнитных аномалий.

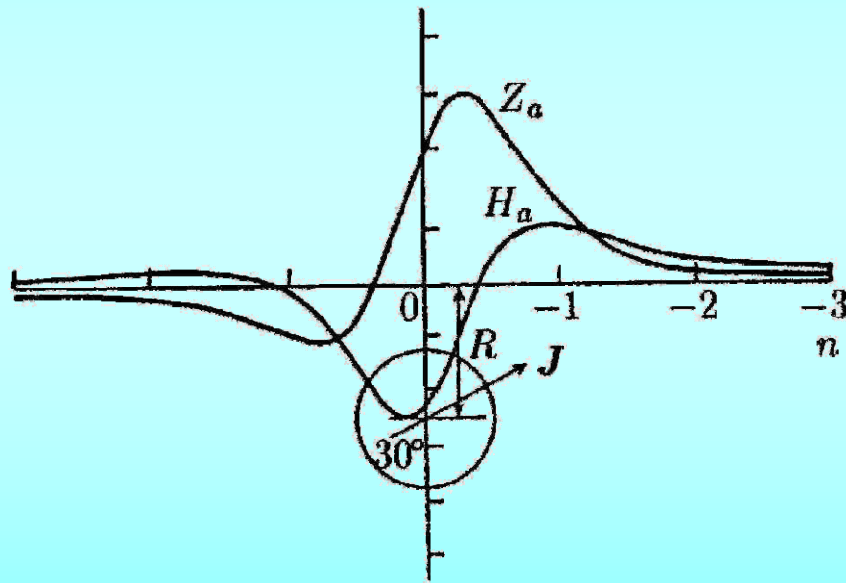


Схема распределения компонент H_a и Z_a аномального поля, вызванного шаром, однородно намагниченным под углом $\theta=30^\circ$ к горизонтальной плоскости.

главное=нормальное

Аномальное поле, как правило, составляет 10^{-2} - 10^{-3} от главного.

Несмотря на малую напряженность аномального поля, аномалия легко определяется по большой величине градиентов \mathbf{B}_a .

Встречаются локальные и региональные аномалии очень высокой интенсивности. Курская магнитная аномалия- аномальное поле в некоторых точках почти в 3 раза превосходит нормальное. Есть место, где магнитное склонение $J=90^\circ$, т.е. такое же, как на магнитном полюсе (как бы третий магнитный полюс).

Аномальное геомагнитное поле

На континентах аномальное магнитное поле имеет сложный характер, представляя во многих случаях сумму нескольких составляющих, имеющих различное геологическое происхождение.

Принципиальным открытием было обнаружение **отрицательных магнитных аномалий**, число которых, как оказалось, сравнимо с положительными. Отрицательной называется такая аномалия, поле которой в Северном полушарии направлено в верхнюю часть пространства, над горизонтальной плоскостью, так что \mathbf{B}_a почти антипараллельно \mathbf{B}_n . Если бы породы намагничивались только по направлению современного геомагнитного поля, то существовали бы только положительные аномалии.

$$I = \chi H_{\text{главн}} + I_{\text{ост}}$$

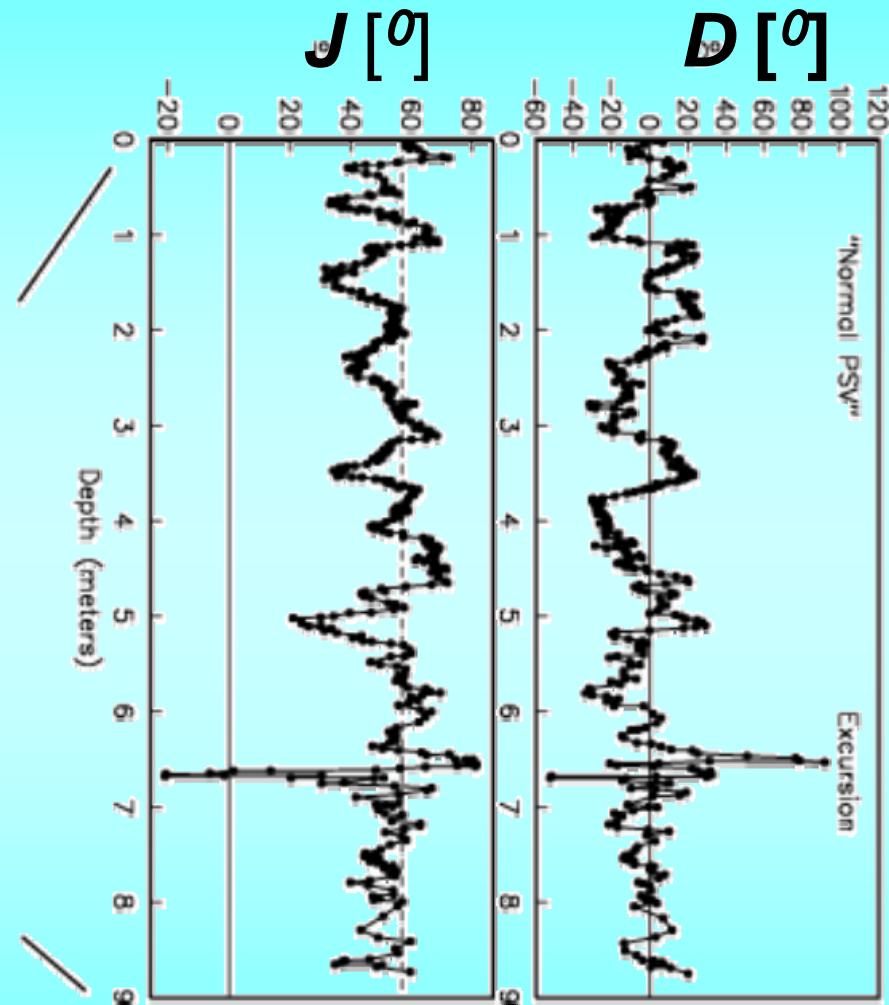
Естественная остаточная намагниченность, как правило, возникает во время образования породы, и возраст $I_{\text{ост}}$ практически одинаков с возрастом породы.

Палеомагнетизм

В большинстве изверженных горных пород I_{ocm} по величине превышает $\chi H_{глав}$ и поэтому направление аномального поля определяется направлением I_{ocm} т.е. направлением древнего магнитного поля. Следовательно, наличие отрицательных аномалий указывает, что они образовались в древнем поле, направление которого было обратным по отношению к современному полю.

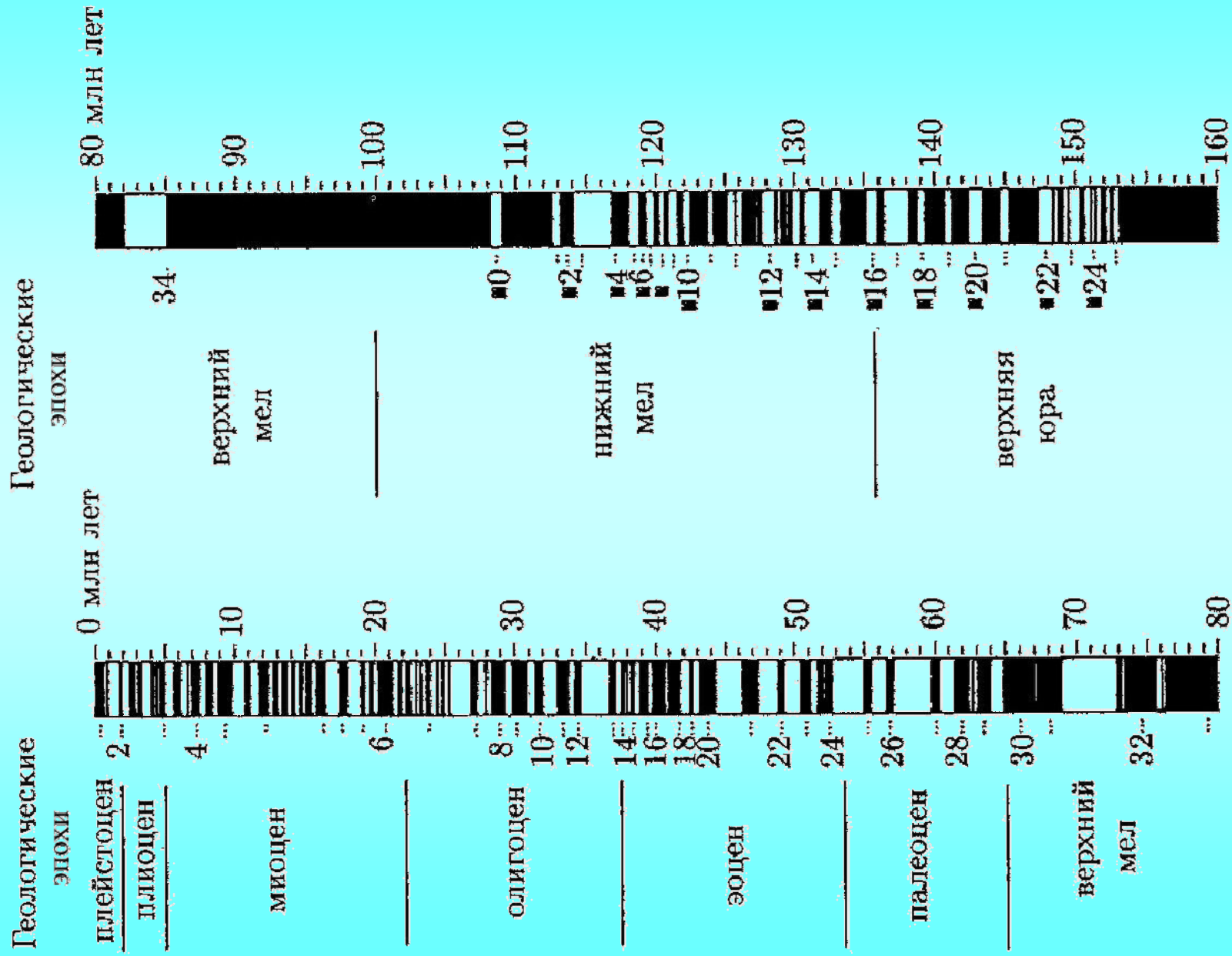
Исследование намагниченности I_{ocm} , величина и направление которой отражает величину и направление древнего поля, которое было во время образования породы, дает возможность изучать историю геомагнитного поля в прошлые геологические эпохи. Такой косвенный метод изучения древнего магнитного поля называется ***палеомагнитным методом.***

Палеомагнетизм осадочных пород

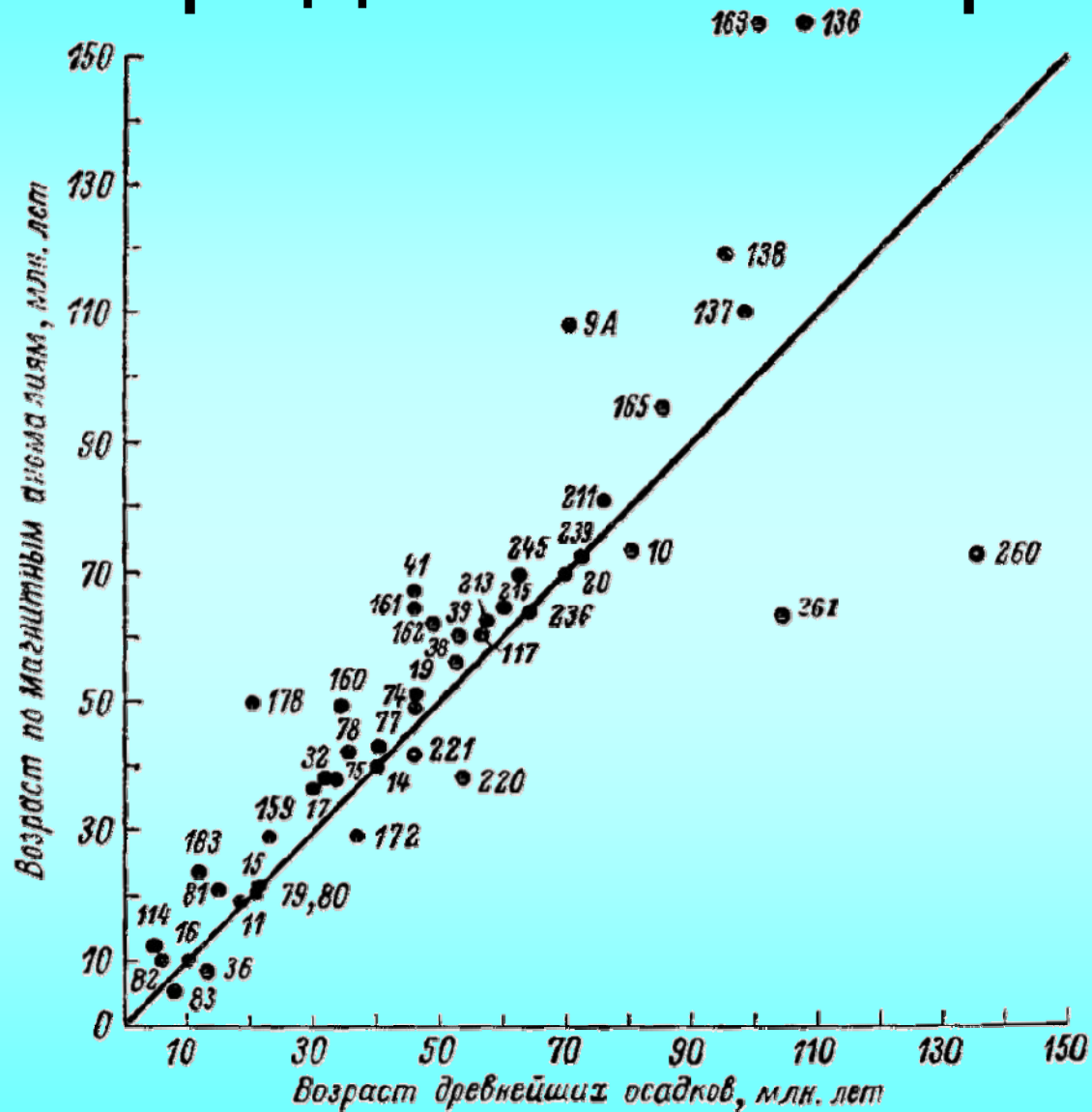


Вариации углов наклоения (D - к северу) и склонения (J - с горизонтом) магнитного поля (the Wilson Creek section к северу от Mono Lake, Калифорния; 23 000 лет)

Магнитохронологическая шкала

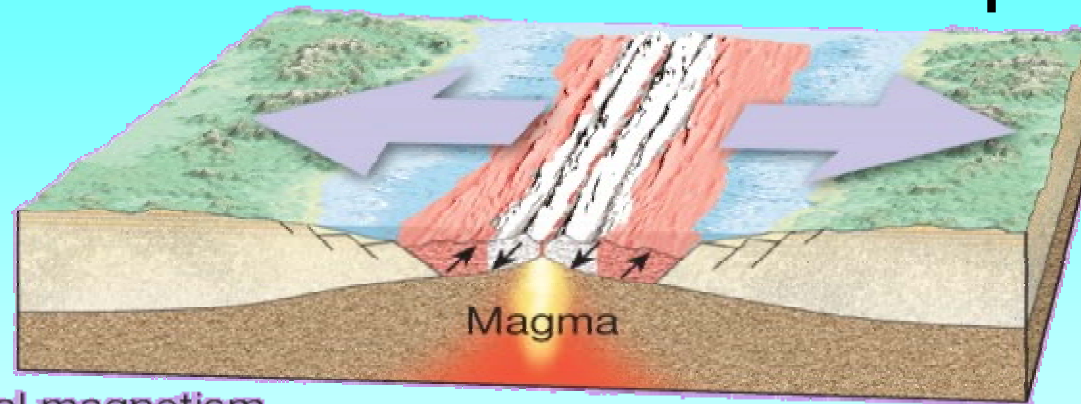


Определения возраста

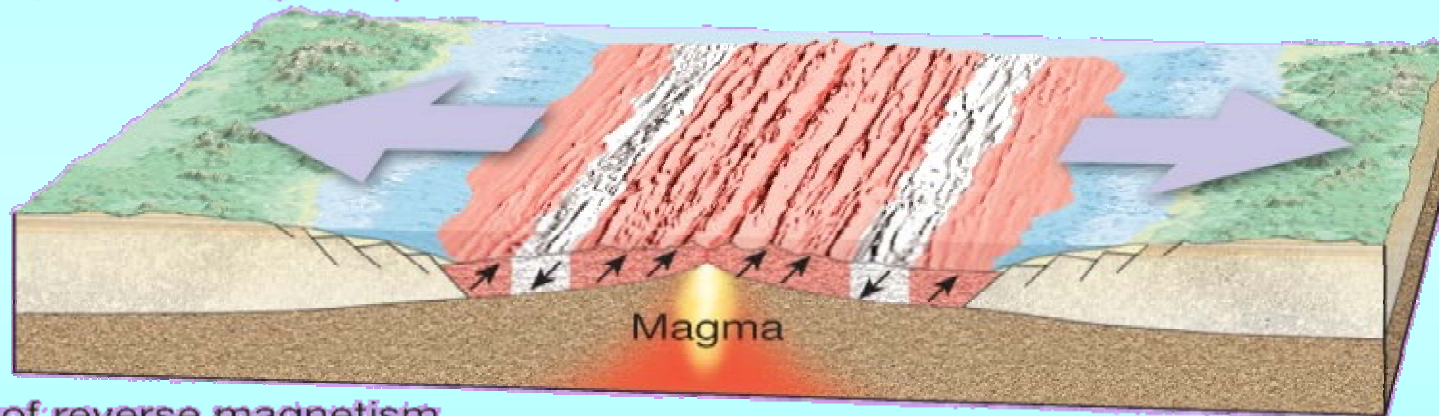


Значения возраста палеомагнитных изохрон и базальтового фундамента океанской коры по данным глубоководного бурения.

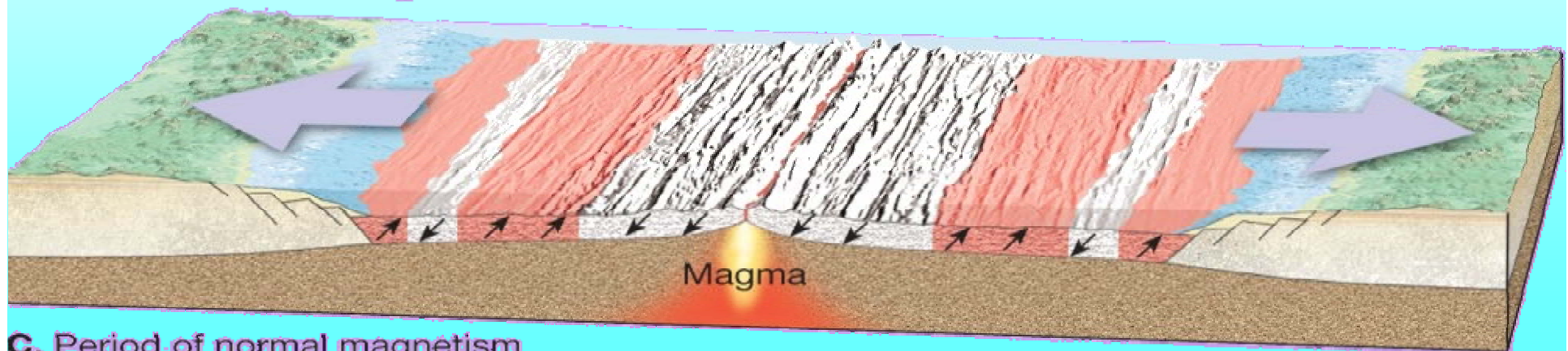
Намагниченность вблизи разлома



A. Period of normal magnetism

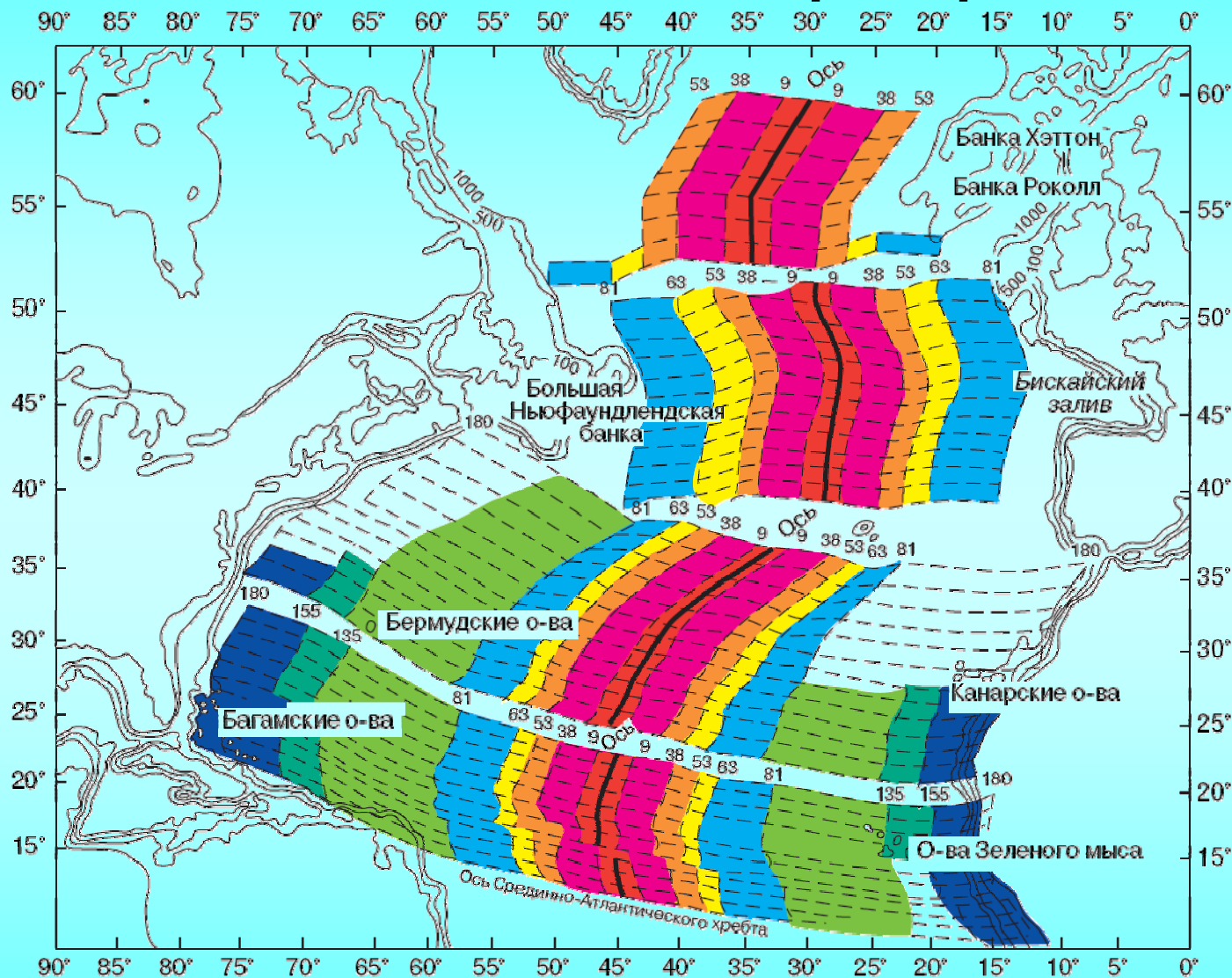


B. Period of reverse magnetism



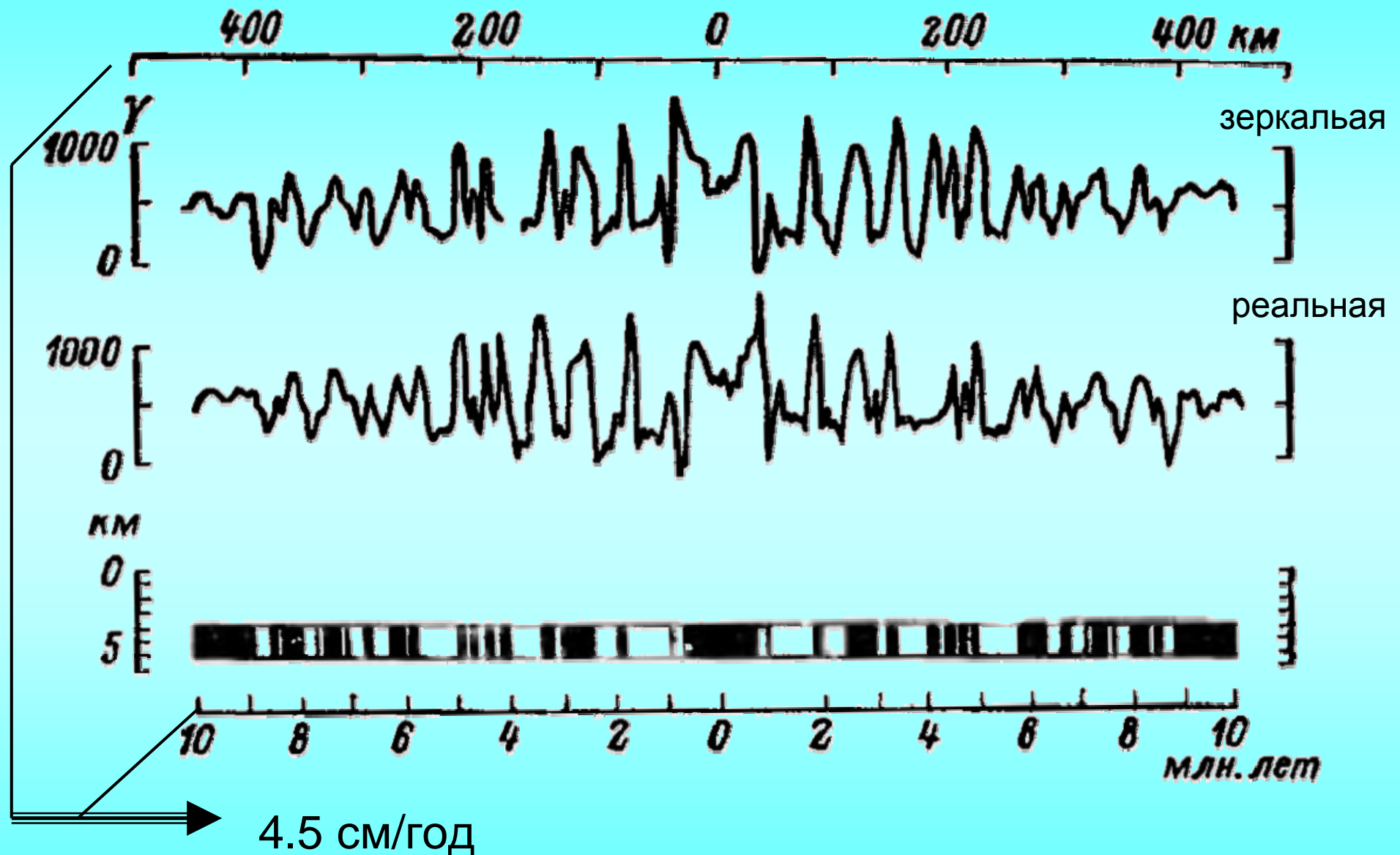
C. Period of normal magnetism

Палеомагнитное картирование



Карта возраста пород океанического дна в Северной Атлантике, составленная по магнитным аномалиям (Питмен и Тальвани, 1972). Границы полос магнитных аномалий (а также линии, им параллельные) можно рассматривать как линии одинакового возраста океанской коры.

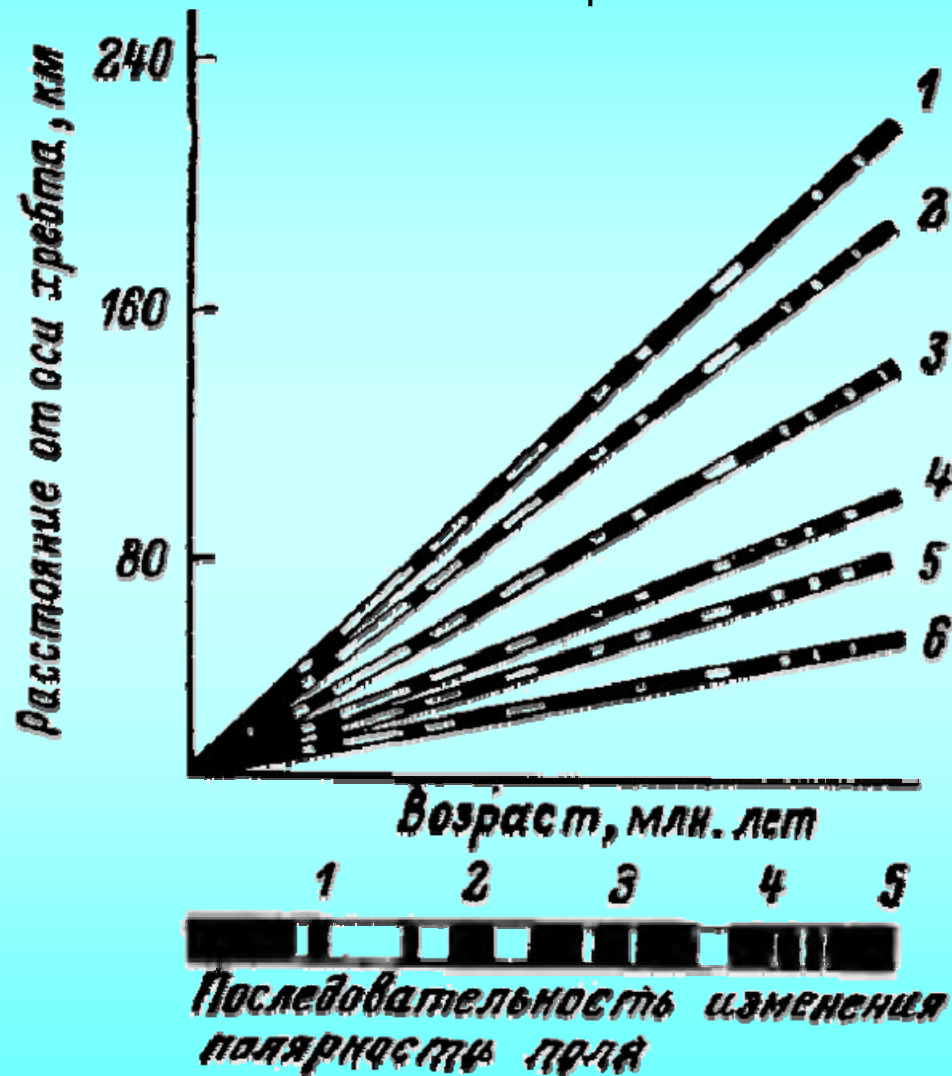
Океанское дно как магнитофонная лента



Симметрия магнитных аномалий относительно оси Тихокеанско-Антарктического хребта (50° ю.ш., 120° з.д.) Мониин, Популярная история Земли, рис. 37

Геомагнитные инверсии

Полосчатые магнитные аномалии океанского дна оказались наиболее удобными для восстановления эпох полярности геомагнитного поля в далеком прошлом.



Черное — полярность, аналогичная современной, белое — обратная;

1 — Восточно-Тихоокеанское поднятие (скорость раздвижения $u = 10\text{—}12$ см/год);

2 — Тихоокеанско-Антарктическое поднятие ($u = 8$ см/год);

3 — Южная часть Индийского океана и северная часть Тихого океана ($u = 6$ см/год);

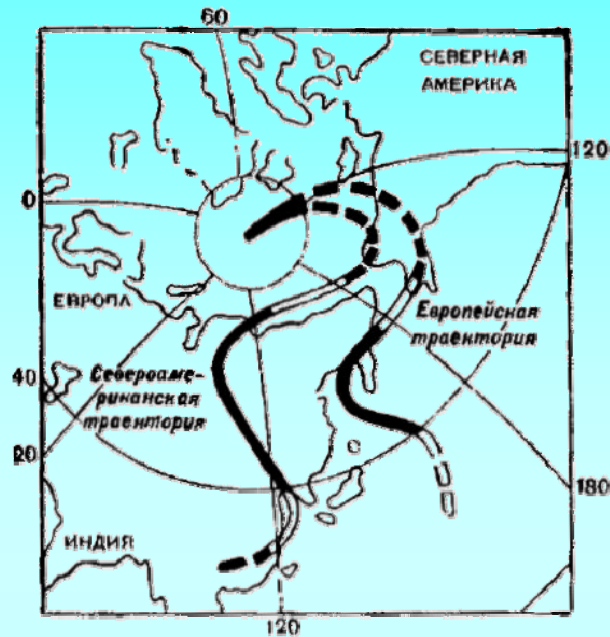
4 — Южная Атлантика ($u = 3$ см/год);

5 — Северная часть Индийского океана ($u = 2,5$ см/год);

6 — Северная Атлантика ($u = 2$ см/год).

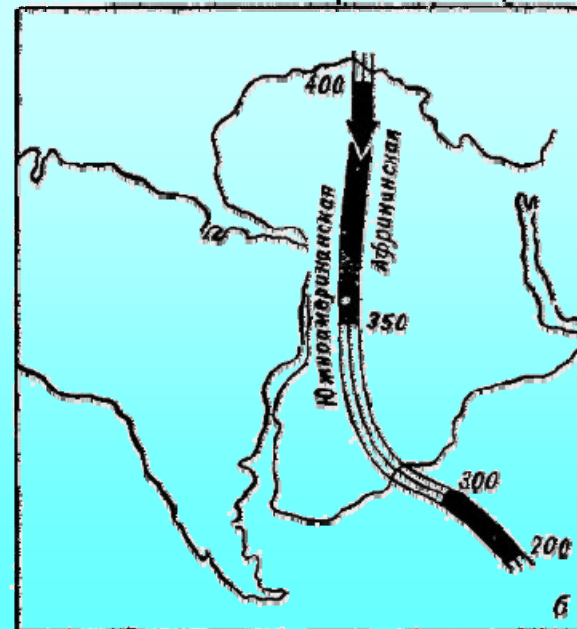
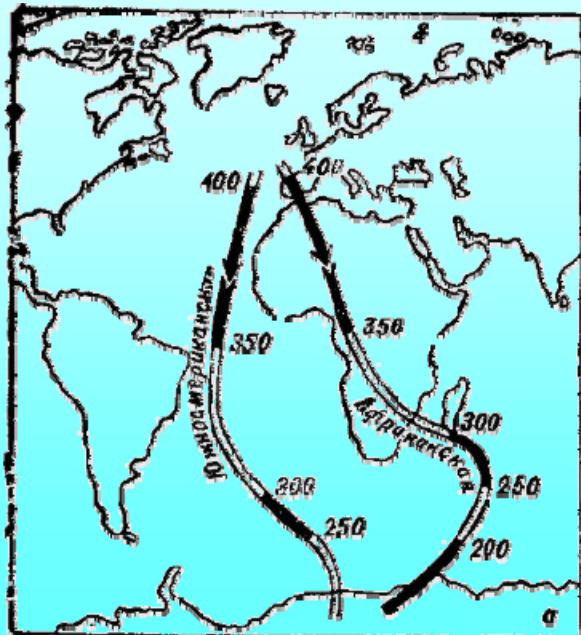
Изменения полярности магнитного поля и ширина полос магнитных аномалий в семи районах Мирового океана. Монин, Популярная история Земли, рис. 38

Дрейф магнитных полюсов



Траектории движения Северного полюса относительно Европы и Северной Америки за последние 400 млн. лет

Траектории движения Южного полюса относительно Африки и Южной Америки в верхнем палеозое при современном размещении континентов



и при их совмещении по линиям материковых склонов.