

## Лекция 15. ГЕОМАГНЕТИЗМ

В 15-ой лекции: Модели глобальных магнитных. аномалии, джерков, инверсий и фокусов векового хода. Движение магнитных полюсов. Магнитное поле планет и спутников.

### **Магнитные аномалии, джерки, инверсии и фокусы векового хода.**

**Аномалии.** На карте полного вектора МПЗ ( $F$ ) хорошо различимы глобальные магнитные аномалии (ГМА). Интенсивность ГМА настолько велика, что её можно сравнивать с интенсивностью дипольной части МПЗ. Четко выделяются четыре аномалии: Канадская, Сибирская, Бразильская (Южно-Атлантическая) и Южная. Эту аномалию иногда называют Южный полюс, объединяя ее с южным магнитным полюсом, что не совсем верно; иногда - Антарктической. Обычно магнитологи, разлагая МПЗ в ряд Гаусса, стремятся сделать так, чтобы первый коэффициент ряда имел максимальное значение. После вычитания из общей структуры МПЗ ее первых коэффициентов ряда, остается т.н. недипольная часть. В оставшемся поле уже не наблюдается так хорошо выраженных аномалий, как это видно на карте. По-видимому, если мы хотим разобраться в том, что представляет собой МПЗ, это не совсем корректная процедура. Более того, хорошо известно, что ГМА "проявляются" в космосе, ионосфере и магнитосфере и вообще "живут" самостоятельной жизнью.

Еще в начале 60-х годов в России с помощью спутников было зарегистрировано открытие, связанное с проникновением высокоэнергетических частиц солнечного ветра в областях северных (Сибирской и Канадской) магнитных аномалий. В областях этих ГМА наблюдалось резкое увеличение энергии и плотности потока частиц. Сотрудники группы академика Вернова зафиксировали, что это увеличение связано с резкими изменениями модуля поля в районах аномалий. В этом плане наиболее изучена Бразильская аномалия. Анализируя материалы, полученные на японском спутнике EXOS-A и на космической станции с телескопом Хаббл, можно убедиться, что эта аномалия "проявляется" до высот 600 км. Плотность потока заряженных частиц в районе БМА превышает аналогичную величину, измеренную в других районах, удаленных от ГМА, на несколько порядков. Магнитные аномалии (в частности, Бразильская) изучались археомагнитными методами, где было показано, что БМА в течение последних 4-х тыс. лет не меняла своего положения, ее эпицентр всегда находился там же где сейчас, на восточном побережье Бразилии. Интенсивность поля этой аномалии за 4 тыс. лет была непостоянной: она дважды возрастала относительно современной примерно в 1.5 раза. Одно из наиболее интересных свойств ГМА состоит в том, что в момент инверсии МПЗ они остаются источниками магнитного поля. Известен такой факт, когда в момент инверсии МПЗ виртуальные магнитные полюса оказывались ориентированными на Сибирскую ГМА. Хорошо известно, что в момент инверсии магнитные полюсы движутся вдоль траекторий, приближающихся к ГМА (рис. 14-28).

**Модель ГМА.** По нашей модели, вещество F-слоя представляет собой двухфазную среду (газ + жидкость), которая с одной стороны, граничит с "газообразным" G-ядром, а с другой, - с внешним - "жидким" E-ядром. В этом слое возможны гидродинамические течения, конвективный теплоперенос, возникновение и дрейф вихрей и т.п. Оцененная разными авторами величина вязкости вещества внешнего ядра (и, по-видимому, F-слоя) находится в пределах  $10^6 - 10^{10}$  Пуаз.

Представим себе, что необходимо решить задачу поддержания постоянной температуры в таком тонком слое. Положим, что в нем могут развиваться конвективные процессы, а механизмами кондуктивной теплопроводности можно пренебречь, тогда число Релея должно быть больше критического.

Число Релея, оцененное для вещества F-слоя:

$$Ra = g\beta l^3 \Delta T / \eta \zeta, \quad (1)$$

$g$  - величина ускорения силы тяжести,  $\beta$  - коэффициент объемного расширения,  $l$  - толщина F-слоя,  $\Delta T$  - перепад температуры на слое,  $\eta$  - вязкость вещества,  $\zeta$  - температуропроводность; значительно больше критического, что означает возможность протекания конвекции в F-слое. Температура вещества F-слоя вблизи границы с внутренним ядром выше, чем у границы с внешним. При конвекции в некоторых областях F-слоя вещество будет опускаться, в других - подниматься. В таком слое возможна турбулентная конвекция, в отличие от стационарной конвекции во внешнем ядре.

Предположим, что в трех областях F-слоя "холодное" вещество опускается в направлении к G-ядру, а в одной – поднимается, вынося при этом тепло из F-слоя. Наверняка существуют и другие области, в которых происходит нечто подобное, но там процессы происходят значительно менее интенсивно, чем в этих четырех, которые явно выделяются на фоне остальных. Будем считать, что эти выделенные области соответствуют глобальным магнитным аномалиям, причем, первые три, это: Канадская, Сибирская и Бразильская аномалии, а четвертая (где происходит подъем вещества) - Южная ГМА. Вещество F-слоя, обладающее достаточно высокой проводимостью, способно захватить с собой "вмороженную" в него силовую линию дипольной части МПЗ и увлечь ее за собой при вихревом движении проводящего вещества поперек слоя. Нисходящий поток проводящего вещества в Северном полушарии за счет влияния кориолисовых сил начинает вращаться по часовой стрелке (аналогично антициклону в атмосфере и океане). Захваченное потоком магнитное поле вращается с ним со скоростью  $v$ , генерируя при этом магнитную индукцию  $B_A$ , иначе, поле аномалии, которая (по модели) не стационарна ( $\partial B/\partial t \neq 0$ ).

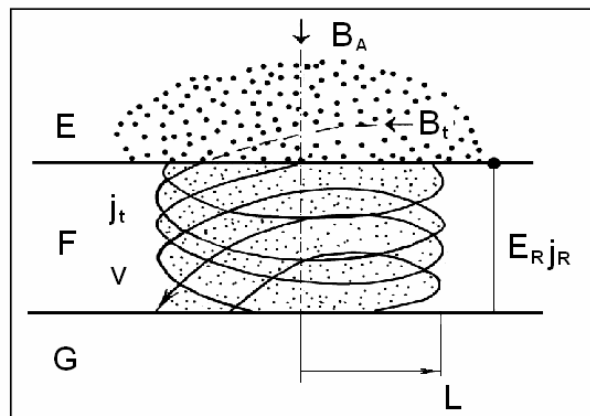


Рис.1. Схема генерации магнитного поля глобальной аномалии как вихря Россби в тонком F-слое. Описание в тексте.

Движение проводящей среды с одновременным ее вращением и вращением, «вмороженного» в среду магнитного поля в магнитной гидродинамике определяется как циклоническая турбулентность. В такой среде возможно возникновение магнитной индукции за счет т.н.  $\alpha$ -эффекта. Суть его состоит в том, что образовавшийся в результате проявления циклонической турбулентности электрический ток зависит не только от величины электрического поля  $E$ , но еще определяется и величиной вмороженного магнитного поля  $B_t$ :  $j = \sigma[E + \alpha B]$ . Захваченное вращающимся потоком поле  $B_t$  создает ток  $j_t$ , который вызывает появление поля (индукции)  $B_A$ . Индукция  $B_A$  (поле ГМА), в свою очередь, создает (и усиливает) ток  $j_R$ , который еще больше усиливает захваченное потоком вмороженное поле  $B_t$  (см. рис.1).

Эффект индукции (усиления поля) описывается в магнитной гидродинамике уравнением:

$$\partial B/\partial t = \text{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta_M \nabla^2 B. \quad (2)$$

Равенство нулю  $\partial B/\partial t$  означает, что поле аномалии стационарно, хотя в действительности это не так. Если движение среды отсутствует, то в этом уравнении  $\text{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$ , что тоже не верно. Если бы это было так, то проявлялись бы только эффекты диффузии поля, которые описывает последний член уравнения. Кроме этого, он показывает наличие потерь, связанных с джоулевым нагревом. Если магнитная вязкость  $\eta_M$  равна нулю, то мы имеем дело с идеальным проводником.

Сделаем некоторые приближенные оценки параметров. Примем характерный размер вихря  $L$  равным 100 (и более) км. Магнитная вязкость  $\eta_M$  равна:

$$\eta_M = (\mu\sigma)^{-1} = 1 \cdot 10^8 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Скорость потока можно оценить, приравняв единице величину магнитного Рейнольдса

$$Re = \mathbf{v}L/\eta_M.$$

Величина  $\mathbf{v}$  оказывается порядка  $10^4$  м/с (3 км/год). (Сравниваем полученную оценку  $\mathbf{v}$  со скоростью западного переноса, полученную нами по скорости дрейфа ФВХ  $\approx 20$  км/год). Необходимо оценить степень влияния магнитных сил на величину и направление скорости  $\mathbf{v}$ . Обычно оценка степени влияния, т.е. оказывает ли магнитное поле влияние на гидродинамику, или она остается пуазейлевой, состоит в определении числа Гартмана  $G$ :

$$G = BL(\sigma/\rho\eta)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $\rho$  - плотность среды, а  $\eta$  - кинематическая вязкость (примем  $\eta \approx 10^6 - 10^8$  Пуаз). Подстановка известных и принятых нами параметров показывает, что  $G > 10^3$ . Это, в свою очередь, указывает, что при оценке гидродинамических характеристик происходящих в земном ядре процессов, необходимо учитывать влияние магнитного поля. Величина тока, необходимого для генерации поля ГМА, равна примерно  $10^8$  ампер. Примем величину  $L = 300$  км, тогда время диффузии поля  $t = L^2/\eta \approx 10$  тыс. лет. Последняя оценка показывает, что после "отключения" основного поля в результате прохождения инверсии, поле ГМА может сохраняться еще, по крайней мере, 10 тыс. лет. В качестве подтверждения этой величины, ещё раз сошлемся на результаты, полученные Клементом при анализе периодов времени инверсии, определенных в различных точках Земли. В зонах влияния ГМА период инверсии составляет 10 – 12 тыс. лет, в то время при отсутствии этого влияния, это время не превышает 2 тыс. лет.

**Фокусы векового хода.** Современные карты годовых изменений величин компонент геомагнитного поля показывают, что существуют несколько областей (регионов), в которых эти компоненты возрастают (убывают) значительно интенсивнее, чем в других. Центральные части этих областей называют фокусами векового хода (ФВХ). Изучая карты современных вековых вариаций, можно выделить:

- Бразильский ФВХ (№ 1 на схеме 1) с максимальной скоростью изменения общей интенсивности поля -200 нТл/год; его координаты  $0^\circ, 40^\circ \text{ W}$ .
- Цейлонский ФВХ (№ 11): + 100 нТл/год,  $10^\circ \text{ N}, 80^\circ \text{ E}$ .
- Индонезийский ФВХ (№ 9): - 40 нТл/год,  $15^\circ \text{ S}, 110^\circ \text{ E}$ .
- Тихоокеанский ФВХ (№ 10): + 60 нТл/год,  $15^\circ \text{ S}, 100^\circ \text{ W}$ .

Анализ аналогичных карт, построенных для более ранних лет, показал, что ФВХ представляют собой области, дрейфующие по поверхности Земли. ФВХ, как правило, зарождаются на экваторе и либо дрейфуют вдоль него в западном направлении (см. схему 1 и рис.2), либо, так же дрейфуя к западу, перемещаются при этом к полюсам и, постепенно уменьшая свою интенсивность, распадаются. В частности, хорошо известен т.н. Каспийский ФВХ, который дрейфовал по территории России и распался на полярном Урале.

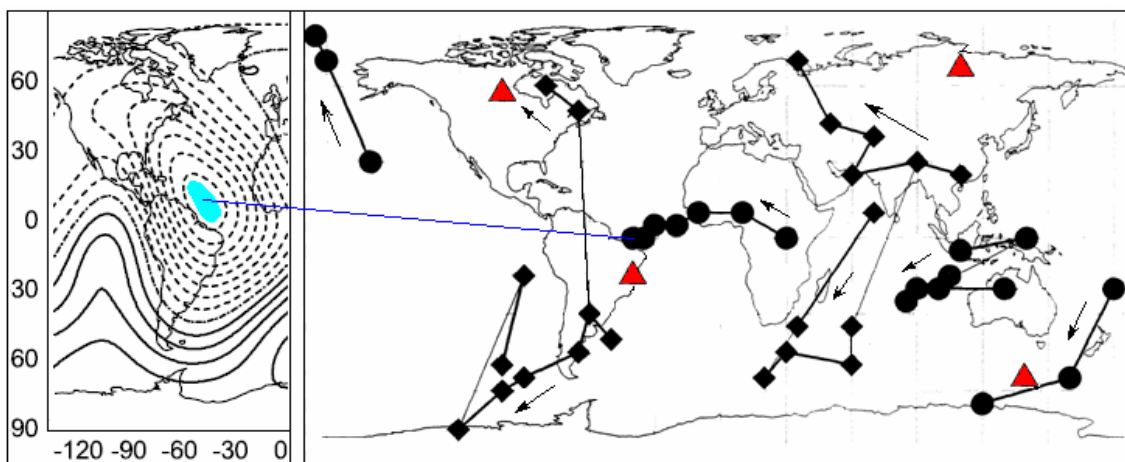


Рис. 2. Слева - фокус векового хода (ФВХ). Справа - карта дрейфа ФВХ с 1743 по 1985 г.г. Треугольники - ГМА. Номера ФВХ приведены на Схеме 1.

ФВХ за последние 250 лет изображены на схеме 1. ФВХ (№ 1) представляет собой циклон (С), Удивительна его стабильность и большое время жизни (> 250 лет). За это время он “успел” пройти путь вдоль экватора от Африки до Бразилии. ФВХ (№ 2), тоже отрицательный, но, так как он двигался в Южном полушарии, - антициклон (А), дрейфуя в западном направлении, по-видимому, был “родителем” ещё трех ФВХ (№№ 7, 6 и 9). Первый из них (№ 7) дрейфовал к северу, два других - к югу. Кроме этих, есть шесть положительных ФВХ. Среди них нет таких, дрейф которых был бы “привязан” к экватору, но и эти ФВХ можно разбить на две группы, внутри которых явно видна их связь: первая объединяет №№ 4 (Каспийский ФВХ), 3 и 11, а вторая, №№ 5, 8 и 10.

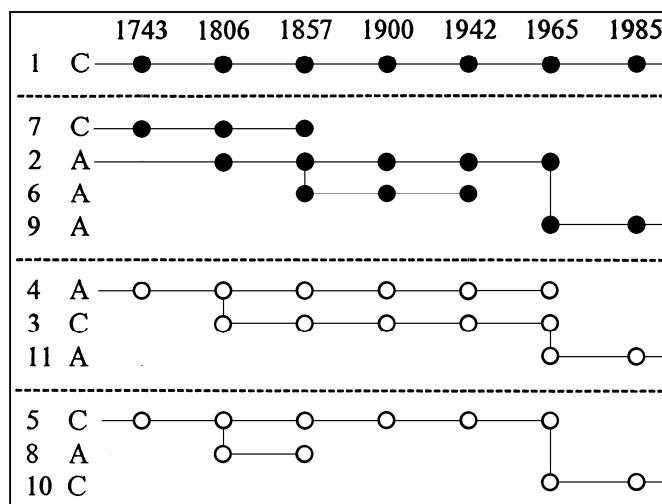


Схема 1. Эволюция фокусов векового хода. (С-циклоны; А-антициклоны).

Общим свойством для всех ФВХ, можно отметить, что все они как бы “обходят стороной” ГМА, ни разу не “столкнувшись” с ними. Возможно, это происходит не случайно. ФВХ, были рассмотрены как гидродинамические вихри, типа вихрей Россби. В этом плане они, аналогично атмосферным вихрям, могут быть циклонами и антициклонами. Направление переноса вихря - ФВХ может быть как к Земле, так и от неё, вращение вихря - как по часовой стрелке, так и - против неё. Все это создает широкую гамму различных гидродинамических явлений, называемых фокусами векового хода.

Представленные на схеме и рисунке данные позволяют оценить величину скорости западного дрейфа ФВХ (вдоль экватора). Скорость дрейфа составляет примерно 10 – 20 км/год. (Возможно, эта оценка каким-то образом характеризует скорость переноса вещества в F-слое в западном направлении).

**Аналогия ФВХ с циклонами и антициклонами.** Спиральное движение потока в области генерации ГМА можно уподобить близким, по сути, циклоническим явлениям, происходящим в атмосфере и океане. В этом плане ГМА: Канадская, Сибирская и Южная - антициклоны, а Бразильская ГМА - циклон. Здесь можно проследить несколько аналогий. Во-первых, по направлению вращения потока, во-вторых, по увеличению поля, как аналог атмосферного вихря. В области атмосферных антициклонов растет давление, в области антициклонов - магнитных аномалий, - возрастает величина магнитного поля. Приведем ещё одну интересную аналогию из области астрофизики. В атмосферах Юпитера и Сатурна сравнительно недавно обнаружены стационарные вихри (вихрь «Большое Красное Пятно» на Юпитере известен более 300 лет), причем, и на *Юпитере*, и на *Сатурне* длительное время устойчиво существуют *по три антициклона и одному циклону*. Циклон-антициклонная асимметрия пока не нашла однозначного объяснения.

Из наблюдений известно, что интенсивность магнитного поля в районах ГМА меняется со временем. Почему это может происходить в нашей модели? Можно найти несколько причин. Перечислим их: изменение скорости потока  $v$ , которая зависит от ряда причин, и, в основном, определяется  $pT$ -параметрами вещества F-слоя. Сюда можно отнести и изменение величины основного магнитного поля Земли, и изменение параметра  $\alpha$ , и изменение проводимости  $\sigma$ , и т.п.

Циклон - антициклонная асимметрия наблюдается в атмосферах больших планет. Такого явления нет ни в атмосфере Земли, ни в атмосфере Венеры. Возможная причина состоит в том, что динамика атмосфер этих планет в значительной степени определяется Солнцем, в то время как динамика атмосфер Юпитера, Сатурна и F-слоя Земли, по-видимому, «управляется» собственным внутренним тепловым потоком.

**Циклон-антициклонная асимметрия.** Более 300 лет астрономы наблюдают за знаменитым Большим Красным Пятном Юпитера (БКПЮ). До недавнего времени природа этого столь долгоживущего атмосферного вихря была совершенно непонятной. Сейчас БКПЮ, а также другие аналогичные структуры, обнаруженные не только на Юпитере, но на Сатурне и Нептуне, принято считать солитонами и вихрями Россби. Причем, солитонами считаются исключительно антициклоны, которых обычно на планете больше, чем циклонов (Незлин, Снежкин, 1990). Аналогичные образования играют значительную роль в динамике верхних оболочек Солнца и больших планет (Тихомолов, 1994; Tikhomolov, 1995; Tikhomolov, 1996). Тихомолов предложил принципиально новую модель глобального вихря, основанную на том, что в слое «тонкой воды», где происходит формирование вихрей Россби, имеется подогрев снизу. Дополнительный подогрев приводит к добавлению в уравнение, одним из решений которого являются локализованные вихри Россби, дополнительных членов, имеющих смысл положительной и отрицательной диффузии. При этом для возмущений достаточно большого масштаба, происходит возрастание их амплитуды. Иначе, дополнительный подогрев играет роль диффузионного переноса, который, добавляясь к гидродинамическому переносу, обеспечивает системе дополнительные обратные связи и приводит её к режиму самоорганизации. Надо сказать, что в природе это проявляется на Солнце и больших планетах и, согласно нашей модели, в F-слое Земли. В атмосферах Земли, Венеры и Марса, где процессы переноса контролируются Солнцем, таких явлений не происходит, не наблюдается и долгоживущих вихрей Россби.

Таблица. 1.

Вихри Юпитера		Вихри Сатурна		ГМА		
Большое красное пятно	22° S	Большая Берта	5° N	Сибирская	67° N	A
Малое красное пятно	19° N	Коричневое пятно	42° N	Канадская	58° N	A
Коричневый овал	14° N	Ультрафиолетовое пятно	24° N	Бразильская	15° S	C
Белый овал	34° S	Пятно Анны	55° S	Антарктическая	55° S	A

В атмосферах больших планет замечена т.н. циклон - антициклонная асимметрия: циклонов всегда много меньше, чем антициклонов. Это связано с тем, что антициклоны (А), это солитоны, в то время как циклоны (С), - нет. Однако, если «рождается» пара циклон-антициклон, то они оба могут быть солитонами. В атмосферах Юпитера и Сатурна наблюдается по три антициклона и одному циклону. БКПЮ тоже является антициклоном. Картина магнитных аномалий на Земле удивительно напоминает картину вихрей на Сатурне, где можно видеть даже хорошее совпадение их по широтам (см. Таблицу 1 и рис. 2).

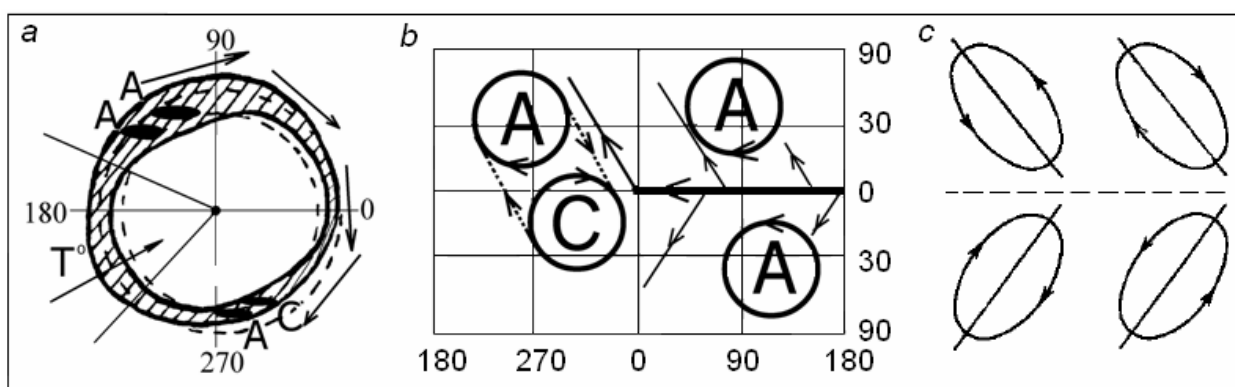


Рис. 3. Модель глобальных магнитных аномалий как циклонов и антициклонов. Проекция вихрей на F-слой, стрелками показано направление гидродинамического переноса. Стрела поперек слоя – температурный градиент. Выделенная область соответствует Тихому океану - *a*. Размещение антициклонов («А», и пара «А-С» - солитоны). Линия вдоль экватора – гидродинамический перенос, ответвления показывают направления «рингов» (ФВХ) - *b*. Вихри, образующиеся при отрицательной вязкости – *c*.

В магнитном поле Земли, как и в атмосферах Сатурна и Юпитера, возникли и продолжают существовать две пары вихрей. Одна пара вихрей состоит из двух антициклонов, другая, - из циклона-антициклона. Пара циклон-антициклон: Бразильская - Канадская аномалии на Земле и атмосферные вихри: Ультрафиолетовое пятно и Пятно Анны, - на Сатурне. Рождение пары вихрей ФВХ (тоже вихрей Россби) можно наблюдать, если обратиться к схеме 1 и рис.2. Вихри Россби являются продуктами самоорганизации структуры, возникающей в жидком, вращающемся, подогреваемом снизу слое. На Юпитере и Сатурне на динамику их атмосфер - влияние Солнца не сказывается, так как внутренние тепловые потоки этих планет заметно больше, чем поток от Солнца на их расстояниях. На Земле динамика атмосферы в значительной степени определяется Солнцем, поэтому нет и подобных долгоживущих вихрей.

**Инверсии.** Инверсия геомагнитного поля была обнаружена в 1906 году Брюнесом при палеомагнитных исследованиях в лаве из Центрального массива во Франции. С тех пор подобные образцы горных пород были найдены во всех частях света. Установлено, что примерно половина всех измеренных образцов пород обладает нормальной намагниченностью, а другая половина - обратной. Долгие годы продолжался спор,

касающийся вопроса, изменяла ли Земля полярность магнитного поля, или обратная намагниченность является результатом воздействия на вещество тех или иных физических или химических процессов. В наше время этот вопрос снят: считается доказанным, что Земля периодически меняет полярность своего поля. Более того, доказана корреляция между частотой смены полярности поля и тектонической активностью планеты. Есть свидетельства тому, что величина температурного градиента (по-видимому, и теплового потока) различны при прямой и обратной полярности поля. Оказывается, что величина температурного градиента пород с обратной полярностью геомагнитного поля несколько выше, чем этот градиент у пород с прямой полярностью.

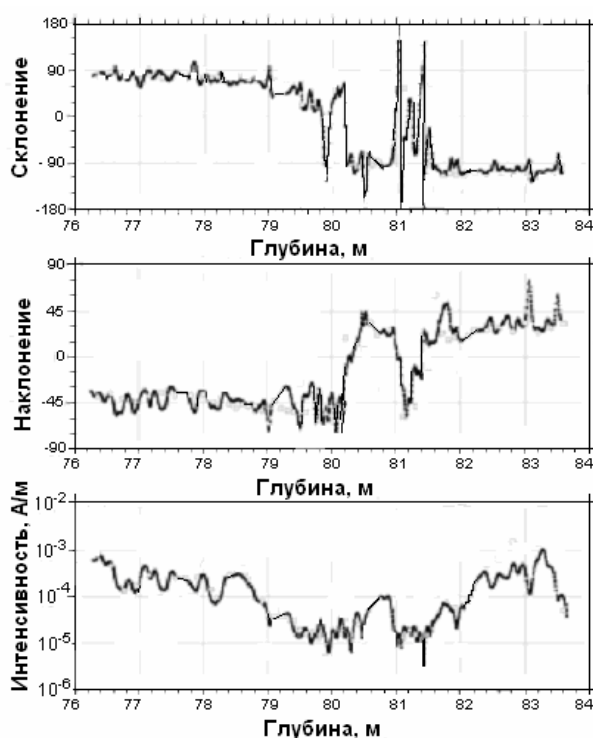


Рис. 4. Изменение параметров геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма: склонения, наклонения и полного модуля поля, в зависимости от глубины осадков (т.е. текущего времени) для Южной Атлантики.

Обнаружено, что в момент инверсии, величина поля значительно понижается, но почти никогда не бывает равной нулю. Величина остаточного поля неравномерна по земной поверхности: она заметно выше в областях магнитных аномалий. Важным параметром является время инверсии, или, что тоже самое, - средняя скорость дрейфа магнитного полюса, т.к. длина его пути известна. Общепринято, что время обращения составляет в среднем от 1000 до 10000 лет, хотя есть оценки и в сто тысяч лет (Паркинсон, 1986). Однако есть и совсем другие оценки, где тщательно изучалось поведение магнитного поля во временных переходных зонах между эпохами Гаусс-Матуяма, Матуяма-Харамильо, а также верхнекембрийской инверсии N→R на ряде разрезов Средней Азии и Восточной Сибири. Авторы выделили несколько кратковременных переполюсовок в течение периода инверсии. Среднее время смены полярности, когда можно говорить об устойчивом состоянии поля, составляет примерно от сотни до тысячи лет. Инверсия включает в себя до десятка и более состояний той или иной полярности поля и промежуточных состояний, когда дипольного поля (и магнитных полюсов) попросту нет. В недавно опубликованной работе Клемента показано, что время переполюсовки Брюнес-Матуяма тем больше, чем дальше точка взятия пробы от экватора. Это явление чем-то напоминает известный факт, что время смены дня и ночи (терминатор) тем короче, чем ближе к экватору.

Таблица 2. Инверсии и экскурсы.

Epochs:	Excurses: ago (kyr),	title:	№
Brunhes 0 - 780	- 2.5	Etrussia	1
	- 15 – 20	Gothenburg	2
	- 25 – 30	Mono Lake	3
	- 35 – 45	Laschamp	4
	- 60 – 70	Kargopolovo	5
	- 68 – 80	Gaotai	6
	- 110 – 130	Blake	7
	- 180 – 200	Biwa I	8
	- 230- 250	Jamaica	9
	- 280 – 300	Biwa II	10
	- 360 – 390	Biwa III	11
	- 469	Emperor	12
Matuyama	-931	Kamikatsara	15
	- 990 - 1.06	Jaramillo	16
	-1.190-1.215	Cobb Mountain	17
	- 1370 - 1440	Ontong Java	18
	- 1675	Gitsa	19
Matuyama-Gauss 2.600	- 1.780 – 1.960	Olduvai	20
	- 2.110 – 2.270	Reunion	21
Gauss	- 3.020 – 3.090	Kaena	22
Gauss-Gilbert 3.570	- 3.210 – 3.290	Mammoth	23
Gilbert	- 3.800	Cochiti	24
	- 4.200	Nunivak	25
	- 4.400	Sidufiall	26
Gilbert boundary, 5.000	- 4.800	Thverta	27
Epoch 5	- 5.100 – 5.300		28
boundary, 6.000	- 5.700 – 6.000		29
Epoch 6 boundary, 7.300	- 7.300		30

(В Таблице 2 различным цветом выделены инверсии: светлый – N, серый – R).

Интересный анализ характера инверсий выполнен Рузмайкиным и Трубихиным. Они показали, что плотность распределения по длинам интервалов между обращениями распределена по случайному (пуассоновскому) закону. Оказалось, что на длительном интервале времени, когда происходит много инверсий, отрицательная полярность поля превалирует над современной положительной полярностью поля. Хотя в течение последнего миллиона лет (690 тыс. лет из него составляет т.н. период Брюнеса) явно прослеживается обратная зависимость. В течение этого периода поле несколько раз меняло полярность на очень короткие периоды времени и возвращалось затем к прежней



полярности. Такие кратковременные события, в отличие от инверсий, принято называть экскурсами.

**Эккурсы.** Периоды современной (положительной) полярности поля (N) и периоды отрицательной полярности (R), длительность которых составляет порядка одного млн. лет, прерываются короткими изменениями поля, называемыми экскурсами. Разделение в значительной степени условно. По всей видимости, природа этих явлений едина.

Обсуждая проблему экскурсов, Петрова и Поспелова (1992) отмечают три важных момента:

- теории динамо не могут объяснить таких резких и кратковременных изменений поля, как экскурсы;
- экскурс, как и инверсия, - это глобальное явление;
- экскурсы происходят во время цикла понижения магнитного момента Земли.

Последнее заключение подтверждается недавно опубликованными данными о поведении магнитного поля Земли в течение последних 800 тыс. лет, где авторы показали, что экскурсы происходят в ситуации, когда дипольный момент опускается ниже критической отметки в  $4 \times 10^{22}$  А м<sup>2</sup>

**Джерки.** Джерками (джерк - резкий толчок во время езды) в геомагнетизме называются резкие изменения производной  $dB/dt$ , т.е. джерк, это резкое изменение скорости роста (убывания) интенсивности компонент МПЗ. Это название берет начало с работы (Courtilot et al., 1978), в которой авторы обратили внимание на поведение вековой вариации Y-компоненты МПЗ в Европе в 1969-70 гг. (см. рис. 5). Необычность поведения поля выражалась в том, что ряд среднегодовых значений  $Y(t)$ , начиная с 40-х годов и до конца 60-х, для каждой обсерватории, хорошо описывался параболой, а затем наблюдалось резкое расхождение наблюдаемых данных и модели. Введение второй параболы для данных после события 1960-70 гг. устраняло это расхождение. Именно это явление и получило название джерк. Начиная с этой работы, было выполнено много исследований, в которых аналогичная методика применялась как для оценки джерка 1969-70 г.г., так и для выделения аналогичных джерков в другие эпохи (Alexandrescu et al., 1996). Для обнаружения джерка авторы строят график зависимости первой производной компоненты геомагнитного поля от времени. Как правило, эта зависимость выглядит как наклонная прямая. Если в какой-то момент времени, эту прямую нельзя продолжить, а следует построить другую, под другим углом, то это событие и есть джерк (рис.5).

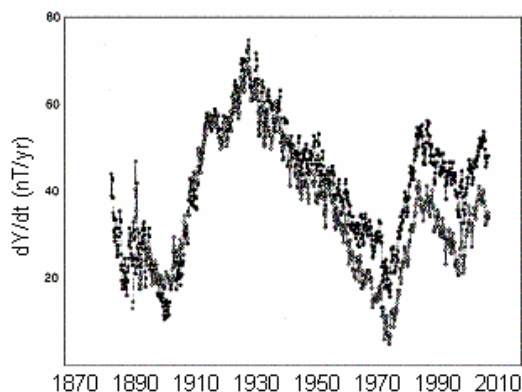


Рис.5. Вековые вариации восточной компоненты геомагнитного поля ( $dY/dt$ ). Резкие изменения производной по данным обсерватории Niemegek, с 1883 по 2000 гг., - джерки (Mandea et al., 2000).

Наилучшим образом джерки проявляются во временной зависимости  $Y$ -компоненты, слабее они видны в  $X$ -компоненте и еще слабее, - в  $Z$ -компоненте геомагнитного поля. Длительность джерка, по данным работы (Gavoret et al., 1986), оценивалась в 6 месяцев. Известны и хорошо изучены джерки, произошедшие практически на всей территории Земли, но с различной интенсивностью в: 1969-1970, 1979-1980, 1989-1992 годах. Сделано предположение о том, что в 1999 г. возможно начался новый джерк и прогнозирует появление следующего, - ранее, чем через 10 лет.

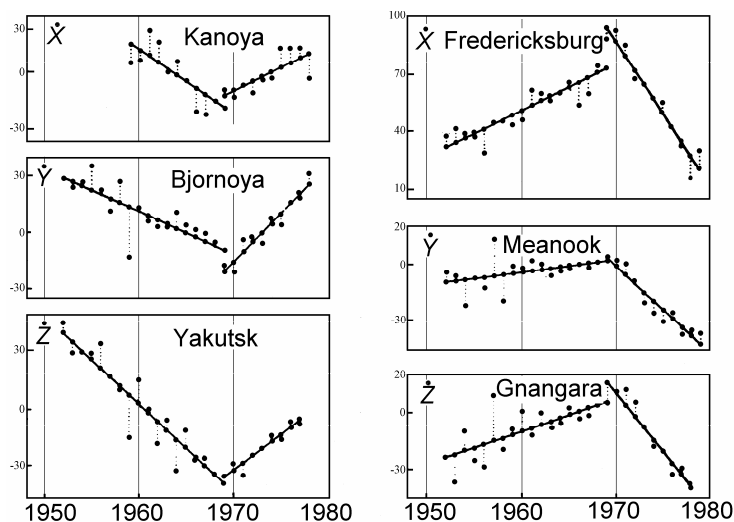


Рис. 6. Джерки 1969-70 г.г. по данным обсерваторий.

По-видимому, можно считать, что  $Y$ -компонента характеризует квадрупольность геомагнитного поля. Изменение величины этой компоненты во времени, вероятно, связано с изменением степени квадрупольности магнитного поля. Очевидно, что симметричный относительно оси вращения дипольный источник генерации геомагнитного поля не должен приводить к появлению  $Y$ -компоненты. Наличие этой компоненты и, собственно, квадрупольности геомагнитного поля можно связать с существованием четырех глобальных магнитных аномалий, представляющих четыре токовых кольца не находящихся на оси вращения Земли. В пользу такой модели говорит распределение джерков 1969 года по поверхности Земли. Как видно из этого рисунка, максимальные величины джерков «привязаны» к глобальным аномалиям.

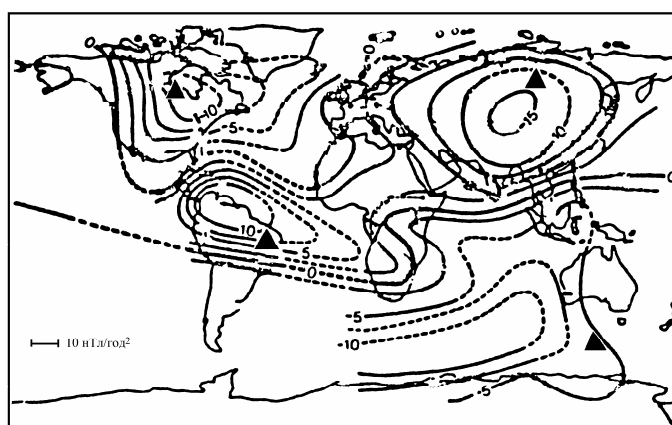


Рис. 7. Распределение интенсивностей джерка-1969. Треугольники – ГМА

Пространственно-временная структура джерка исследована в нескольких работах. Так в (Nevanlinna, 1984) по данным о вековых вариациях МПЗ за 1956-1978 г.г. для 48 обсерваторий построена модель поля в виде четырех радиальных диполей,

расположенных на радиусе  $0.25R$ . Автор этой работы обнаружил поразительный факт: во время джерка 1969-70 г.г. в ряде регионов Земли западный дрейф сменился на восточный. В (Madden, Le Mouel, 1982) замечено, что пространственное (на поверхности Земли) распределение регионов, занятых джерками, тяготеет к ГМА (рис. 7). Две последние работы показывают несомненную связь джерков с западным дрейфом фокусов векового хода (ФВХ), с одной стороны, и, с другой, с глобальными магнитными аномалиями. Именно поэтому в нашей модели джерки рассматриваются в контексте с ГМА и ФВХ.

**Модели инверсий, экскурсов и джерков.** Модель геомагнитного динамо, в принципе, объясняет механизм усиления первичного поля, захваченного Землей в мировом пространстве, и, тем самым, объясняет идею генерации дипольной части поля. Однако ни одна динамо модель не в состоянии найти правдоподобное объяснение инверсий и экскурсов поля. Наличие джерков, вообще говоря, находится в противоречии с динамо моделью. Это обстоятельство связано с тем, что для генерации поля на динамо эффекте необходима вполне определенная (и не малая) величина проводимости среды, приближающейся к сверхпроводимости, что автоматически определяет временной диапазон процессов, происходящих в ядре Земли. Характерное время в различных динамо моделях колеблется в очень нешироких пределах и составляет  $\sim 100$  тыс. лет. Что же касается джерков, то в литературе по геомагнитному полю отсутствуют даже попытки найти объяснение таким явлениям. Явление возникновения джерков иногда связывается с изменением характера дрейфа северного магнитного полюса. Однако если такая связь и существует, это не помогает вскрыть физику джерка.

Согласно развиваемой нами модели, инверсии, экскурсы, джерки и пр. - явления термодинамические, связанные с "работой" фазового перехода. Магнитное поле является своеобразным "маркером" этих процессов. С такой позиции становится очевидной и понятной ещё одна особенность геомагнетизма - высокая стабильность поля во времени. Ни в одной модели генерации геомагнитного поля не встречается даже намёка на устройство или схему, поддерживающую амплитуду поля постоянной. В нашей модели, когда температура фазового перехода при заданном давлении является константой, эта особенность МПЗ очевидна. В этом плане, повторим: *такие явления, как аномалии, фокусы и джерки, ни что иное, как следствие функционирования фазового перехода и, связанной с ним, «работы» системы поддержания температуры в F-слое.*

Согласно нашей модели, ГМА представляют собой области, в которых происходит конвергенция потока, реализуется спиральное движение потока и т.д. Именно здесь, в основном, "работает" механизм выравнивания температуры F-слоя. Эту роль выполняет механизм конвекции. Режим регулирования температуры может изменяться по мере того, как температура среды будет приближаться к температуре, при которой происходит смена режима конвекции. Очевидно, что такие изменения наиболее резко будут проявляться именно в областях конвергенции потока, т.е. в областях генерации ГМА. Представим себе, что в F-слое, по мере конвективного теплового регулирования, была достигнута оптимальная температура  $T_0$ . Предположим, что система терморегулирования, поддерживающая эту температуру в интервале  $T_0 \pm \Delta T$ , не линейна. Закон изменения температуры может иметь вид:  $T^2 \sim kt$ , что вполне допустимо. Скорость изменения температуры оказывается в этом случае:  $dT/dt \sim t^{-1/2}$ . Затем, в момент времени  $t$  ( $T = T_0 + \Delta T$ ) в системе меняется знак производной и температура начинает уменьшаться, иначе, происходит уменьшение скорости:  $d^2T/dt^2$  (рис. 8). Примерно так «работает» любая динамическая система терморегулирования. Будем полагать, что такая система, или ей подобная, регулирует температуру в области фазового перехода. Согласно нашей модели, в момент времени  $t$ , происходит изменение скорости вариации величины  $E_R$  и, соответственно, индукции  $B$ . В качестве подтверждения правомерности развиваемого

здесь подхода, сошлемся на полученную зависимость «броска» (jump) величины  $B$  ( $\cdot 10^{22}$  А м<sup>2</sup>) от длительности периода инверсии  $t$  (в млн. лет):  $B^2 \sim t$ .

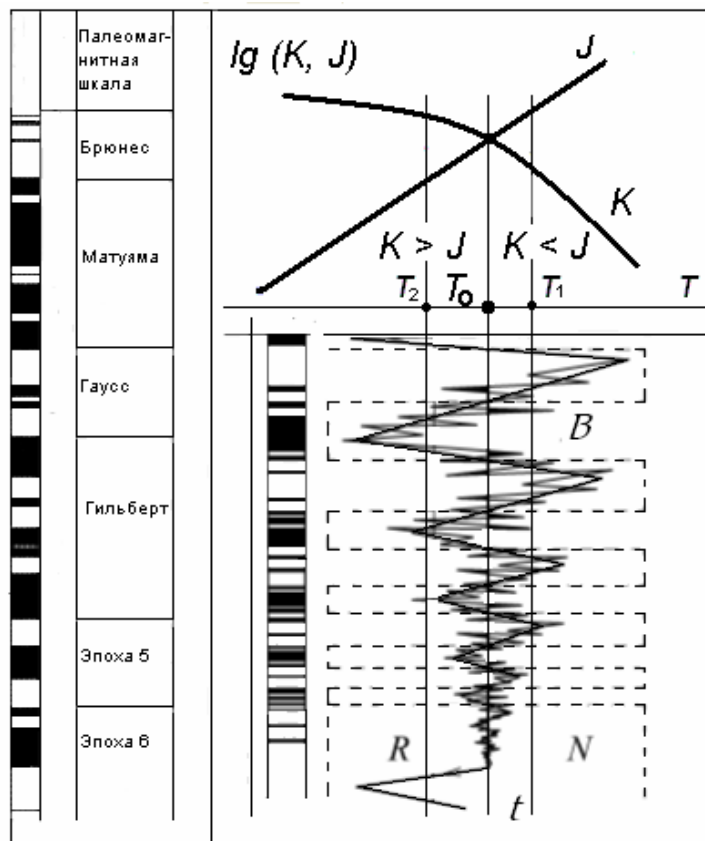


Рис. 8. Слева - палеомагнитная шкала. Справа - наша модель изменений полярности поля. Зависимость явлений, связанных с «работой» фазового перехода во времени и их отражение в геомагнитном поле.

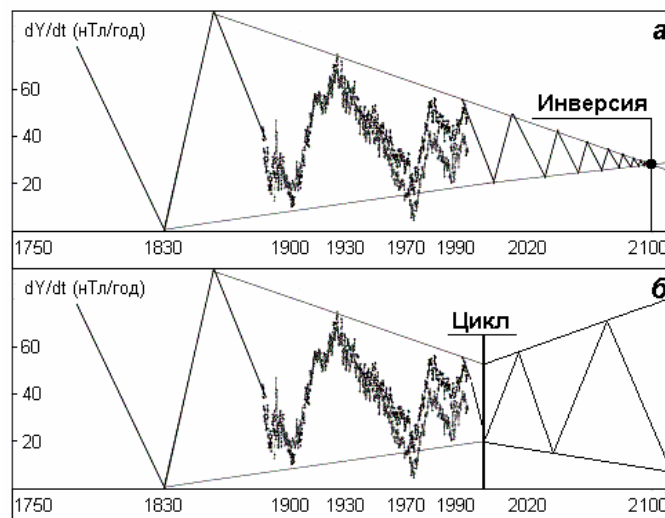


Рис. 9. Изменение частоты джерков со временем (прогноз). Выход системы на стационарное состояние и начало инверсии – а. Уменьшение частоты джерков после 2000 и цикличность – б.

Выясним, почему джерки наиболее эффективно проявляются в Y-компоненте поля? Предположим, что Y-компонента геомагнитного поля характеризует степень

квадрупольности источника его генерации. Действительно, симметричный относительно оси вращения дипольный источник генерации геомагнитного поля не должен приводить к появлению Y-компоненты. Наличие этой компоненты и, собственно, квадрупольности геомагнитного поля, можно связать с существованием четырех глобальных магнитных аномалий, представляющих четыре радиальных токовых кольца не находящиеся на оси вращения Земли. В пользу такой модели говорит распределение джерков 1969 года по поверхности Земли, где показано, что эпицентры максимальных величин джерков практически совпадают с эпицентрами глобальных аномалий (рис.7). Становится понятной пространственная взаимосвязь джерков с ГМА.

**Модель ФВХ.** Предположим, что поверхность F-слоя окажется неравномерно нагретой. В такой системе начнется гидродинамический перенос (пуазейлево течение). Это течение принципиально отличается от рассмотренного нами ранее, конвективного течения, существенно меньшим масштабом. Как отмечалось, геострофическое приближение не применимо на экваторе, где условия равновесия могут достигаться только при круговых изобарах, когда сила барического градиента уравновешивается центробежной силой. В экваториальной зоне могут существовать только циклонические образования. Такие циклоны аналогичны вихрям ГМА, но отличаются от них меньшей интенсивностью, большей подвижностью, участием в пуазейлево переносе и существенно меньшим временем "жизни". По-видимому, наиболее близкая гидродинамическая аналогия, это "ринги" в океане дрейфующие в западном направлении.

Ринги - синоптические вихри, образуемые в атмосфере и океане. В принципе, они могут быть как циклонами, так и антициклонами. Характерный размер рингов в океане порядка 100 км. Они медленно (по сравнению со скоростью вращения Земли) вращаются вокруг своей оси и дрейфуют в западном направлении со скоростью, близкой к скорости Россби. Линейная скорость вращения воды в рингах существенно меняется по толщине слоя и в поверхностных слоях обычно в несколько раз выше, чем скорость их дрейфа. Время жизни рингов в океане обычно не превышает нескольких месяцев. Однако за время жизни эти вихри успевают дрейфовать в западном, северо-западном или юго-западном направлениях на тысячи километров. Надо сказать, что на существование вихрей в океане очень заметную роль оказывает влияние Гольфстрима. Ринги считаются вихрями Россби, если время их существования ограничивается дисперсионным распылением вихря. Это в большей степени касается циклонов. Время жизни антициклонов ограничивается в большей степени вязкостью среды.

Перенос сведений о синоптических вихрях на ситуацию с ФВХ позволяет оценить ряд гидродинамических параметров среды. Примем скорость движения ФВХ, как вихря Россби, равной 0.03 см/с, и предположим, что скорость частиц в вихре примерно в 10 раз выше. Примем размер вихря  $\sim 100$  км, а толщину экмановского слоя  $l \approx 1$  км. Параметр Кориолиса  $2\omega \approx 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Эти предположения позволяют оценить величину вязкости вещества F-слоя:  $\eta = 2\omega l^2$ . Коэффициент вязкости вещества F-слоя оказывается порядка  $< 10^6$  Пуаз (Кузнецов, 1995), что неплохо согласуется с полученной нами оценкой этого параметра.

#### **Движение магнитных полюсов.**

Известно, что оба магнитных полюса дрейфуют не хаотически, а имеют вполне определенные направления. Этот факт позволяет надеяться на то, чтобы не только найти причину такого дрейфа, но и прогнозировать его в будущем.

**Северный магнитный полюс.** Инструментальное определение координат положения северного магнитного полюса (СМП) было начато капитаном Россом в 1831 г, когда он оценил координаты СМП:  $70^\circ 5' \text{ N}$  и  $96^\circ 46' \text{ W}$ . В течение последующих 70 лет измерений

положения СМП не проводилось. В 1904 году во время экспедиции Амундсена были определены координаты СМП:  $70^{\circ} 30' N$  и  $95^{\circ} 30' W$ . Оказалось, что СМП за последующие 70 лет, переместился по направлению к Северному географическому полюсу, в точку, отстоящую от предыдущего измерения всего на 50 км. Этот факт не нашел объяснения.

Этап современных наблюдений положений СМП начинается с измерений, проведенных канадским магнитологом П. Серсоном в 1948 г. С тех пор примерно раз в 10 лет наблюдения за дрейфом СМП ведутся сотрудниками канадской обсерватории Crescent. Измерения положения СМП 1999 г. показали, что скорость дрейфа СМП по сравнению с 1994 г увеличилась в 1.5 раза за последние 5 лет и достигла значения в 26 км/год. Известно сообщение о совместном Natural Resources Canada и Bureau de Recherches Geologiques et Minières, France определении положения СМП в мае 1999 и, повторно, в мае 2001. Авторы, участники этих экспедиций определили положение СМП и оценили скорость современного дрейфа его выше 40 км/год.

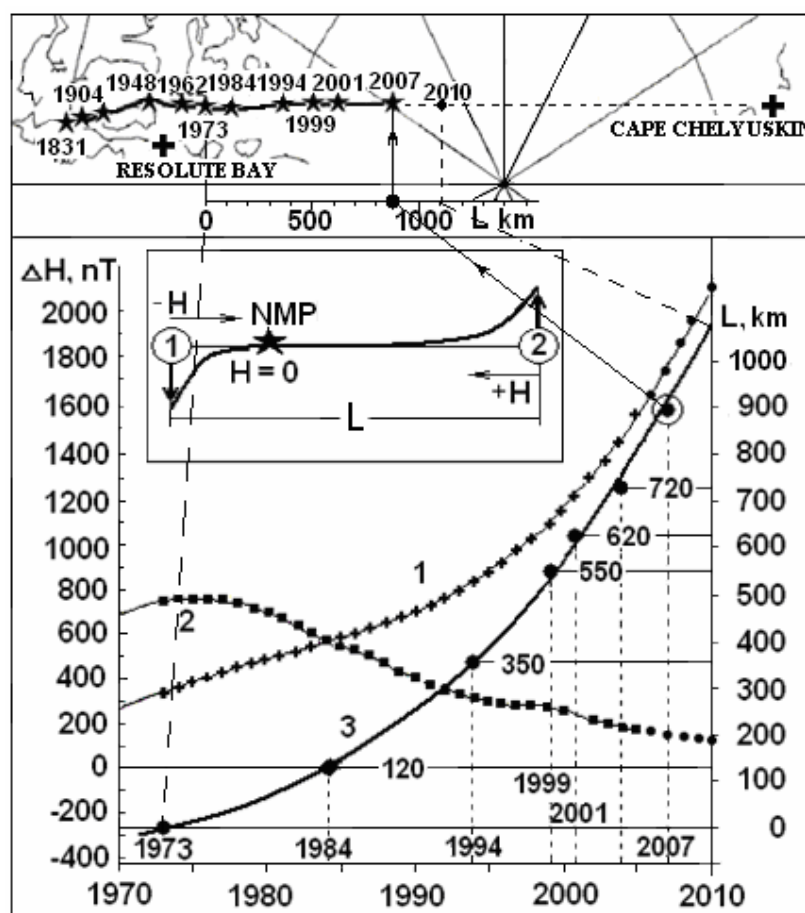


Рис. 10. Верхняя панель: Дрейф СМП: звездочки и годы, Крестики – местоположения обсерваторий. Вставка: схема дрейфа СМП. 1 и 2 квазиисточники горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Нижняя панель: Вариации Н-компонент, определенных в обсерваториях Резольют Бей – 1 (крестики) и Мыс Челюскин – 2 (квадраты). Точки – экстраполяция. Кривая 3 – разность величин  $\Delta H$  между кривыми 1 и 2 (нТл). Точки на кривой – положения СМП на шкале расстояний, в которой за нуль принято положение СМП-1973.

Анализируя эффект увеличения скорости дрейфа СМП, обнаруженный в течение последних 30 лет наблюдений, авторы (Newitt et al., 2002) высказывают предположение,

что ускорение полюса каким-то образом связано с явлением Jerk-1969 и следующими за ним джерками. Возможно, авторы правы, и действительно это явление связано с дрейфом полюса и даже оказало какое-то влияние на ускорение его дрейфа, однако, прежде чем обсуждать это предположение, обратимся к данным, характеризующим направление и скорость дрейфа СМП за значительно больший период времени, чем последние 30 лет его ускорения.

Определение местоположения северного магнитного полюса (СМП), проведенное в 1994 году, показало, что полюс за прошедшие 10 лет не изменил направления своего движения. Этому направлению СМП следует, по крайней мере, 90 лет (см. рис.10). Средняя скорость дрейфа в течение этого периода времени - немного возросла. Она достигла 15 км/год, против 11 км/год, в предыдущие 11 лет (Newitt, Niblett, 1986; Newitt, Barton, 1996).

Обратим внимание на то, как происходил дрейф СМП в течение последних 100 лет и, особенно, в самое последнее время. Рисунок 10 показывает направление дрейфа СМП, которое отмечено звездочками, причем около каждой приведен год измерения его положения. Видно, что СМП дрейфует вдоль линии, практически соединяющей две обсерватории Резольют Бей и Мыс Челюскин. В большем масштабе, эта линия соединяет две глобальных магнитных аномалии, одна из них расположена в Канаде, а другая, - в Сибири (рис. 11). Направление дрейфа СМП совпадает с местоположением виртуальных магнитных полюсов (ВМП), определенных во время совместной Канадско-Российской лыжной экспедиции 1988 г. Перед началом этой экспедиции нами был сделан предварительный прогноз положений ВМП. Наш прогноз базировался на известных измерениях компонент магнитного поля в Арктике (Кузнецов и др., 1990). Вычисленные по прогнозу координаты ВМП практически совпали с координатами, измеренными на значительной части пути экспедиции. Очевидно, что характер дрейфа СМП не случаен. Этот факт оставляет надежду понять природу его дрейфа.

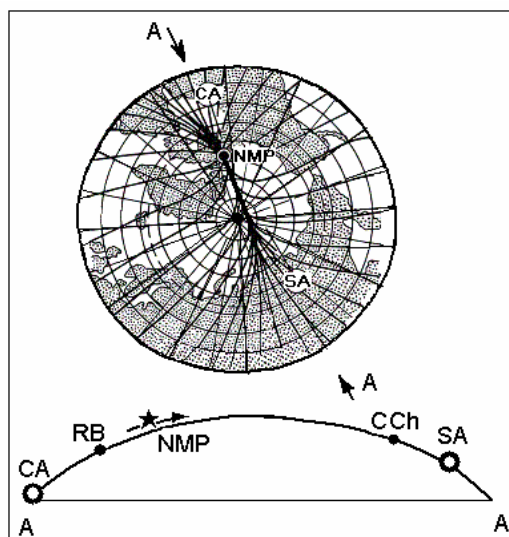


Рис. 11. Структура магнитных силовых линий в Арктике (Норе, 1959). На схеме: CA, SA - ГМА, RB, CCh - обсерватории.

ГМА, инверсии, экскурсы, джерки и ФВХ, это “особые точки” геомагнетизма, в которых это явление проявляется наиболее ярко. Мы уже упоминали, что такие “проявления” должны логично “вписываться” в общую концепцию. К таким особым точкам с полной уверенностью можно отнести магнитные полюса и их дрейф. Нельзя сказать, чтобы движение СМП, как и южного магнитного полюса (ЮМП), вызывало бы повышенный интерес у магнитологов. По-видимому, отсутствие интереса оправдывалось тем, что в модели магнитного динамо не существовало ни одной правдоподобной идеи,

связанной с дрейфом полюсов. Первым, кто высказал мысль о возможной связи дрейфа СМП с глобальными магнитными аномалиями (ГМА) Канадской (СА) и Сибирской (SA), был канадский магнитолог Р. Хоуп (Hope, 1959). В своей статье он изобразил магнитные силовые линии в Арктике, которые как бы сжимались в районе дрейфа СМП в некий "жгут" (см. рис. 11). Хоуп считал, что СМП перемещается по линии, соединяющей обе аномалии. Идеи Хоупа не нашли должного внимания среди магнитологов и были забыты.

Двадцать лет назад автором предложена модель, согласно которой движение СМП определялось влиянием трех (а не двух, как у Хоупа) независимых друг от друга источников магнитного поля (Кузнецов, 1984). Два из них это ГМА, а третий (или точнее, первый) - это источник основного (дипольного) поля Земли. Основное отличие этой модели от общепринятых представлений о магнитном поле Земли заключалось в том, что ГМА представлялись не недипольной частью, как это обычно принято, а достаточно интенсивными источниками, квазинезависимыми от основного поля (Кузнецов, 1990). Интенсивность источников ГМА оказывается сравнимой с интенсивностью источника основного поля. Компьютерное моделирование магнитного поля в Арктике, как суммы независимых источников, дает результат, весьма схожий реальной ситуацией.

Разработанная модель позволяет делать прогноз положения СМП в зависимости от интенсивностей источников поля ГМА. При этом полагается, что интенсивность дипольного источника постоянна. На основе этой модели и интерполяции интенсивности магнитного поля в районе ГМА к 1994 году (по данным полярных магнитных обсерваторий) был составлен прогноз местоположения СМП-1994. Прогнозируемое положение СМП практически совпало с определением его по результатам наблюдений во время экспедиции к СМП в 1994 году (Кузнецов, 1996).

***Прогноз положений СМП.*** Систематические наблюдения за склонением и наклонением начинаются примерно с 1540 года. Наиболее полные данные известны для Лондона на обсерватории в Хартленде (координаты: 51° 00' N, 355° 31' E), после перевода ее из Гринвича и Абингера. Известен рисунок, на котором представлены сглаженные результаты наблюдений за I и D, опубликованные впервые Бауэром для Лондона и Бостона (Baueg, 1895) и впоследствии повторенные в нескольких монографиях по геомагнетизму. Взглянув на этот рисунок, можно видеть, что, по крайней мере, в течение 450 лет наша модель движения СМП не противоречит реально наблюдаемой ситуации. Более того, анализируя результаты наблюдений склонения и наклонения в Лондоне и Бостоне (данные для Бостона, после того как они заканчивались 1900 годом, редуцированы по результатам наблюдений обсерватории в Оттаве), можно получить информацию о том, как в действительности перемещался СМП в течение последних 450 лет.

Если бы СМП двигался по эллипсу, как это показано на этом рисунке, то вполне возможно, что определение местоположения СМП, сделанное Дж. Россом, было ошибочное, и в действительности СМП в 1831 году находился восточнее примерно на 100 км. Если мы правильно восстановили дрейф СМП за этот период времени, то он перемещался в полном соответствии с нашей моделью. Что же касается возможной ошибки Джеймса Росса, то при существовавшем в то время техническом уровне измерений и отсутствии контроля за временными вариациями магнитного поля, это вполне допустимо. Можно добавить еще один аргумент в пользу того, что Росс ошибся. Анализ данных по магнитному полю в период с 1550 по 1990 г.г. показывает плавный характер его изменения в 1830-1900 г.г., что должно было бы быть не так, если бы Росс не ошибся. Действительно, СМП дрейфовал, начиная с 1904 года с более или менее постоянной скоростью (примерно 10 км/год). В то же время как за 70 с лишним предыдущих лет (1831-1904) он "прошел" всего 50 км. Нам представляется, что наша модель движения СМП, когда он сначала дрейфовал к югу, а затем (в 1860 году) изменил направление дрейфа и стал двигаться к северу, подкрепленная данными по дрейфу ВМП,



более логична, чем тот его путь, который изображен на рис. 12. Таким образом, дрейф СМП можно представить как периодическое, колебательное движение.

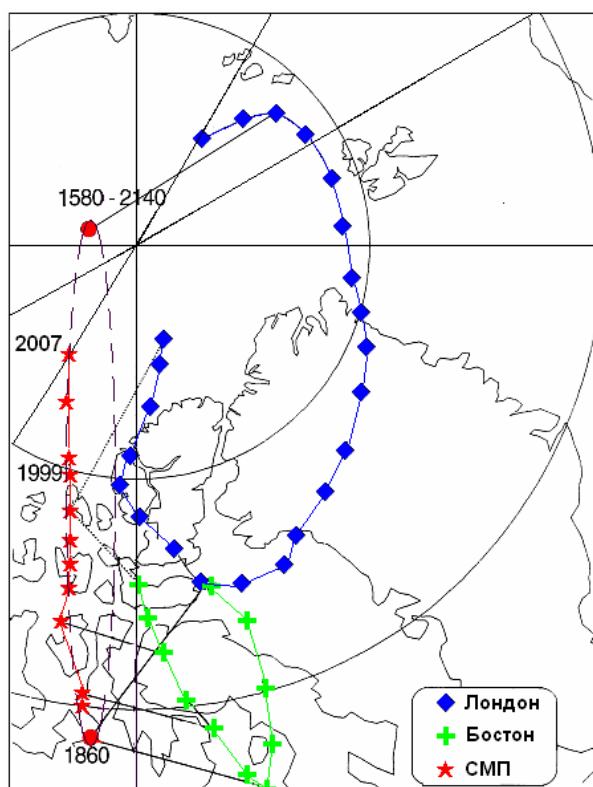


Рис. 12. Перемещение СМП и виртуальные магнитные полюса, построенные по данным склонения и наклонения на обсерваториях Лондона и Бостона (Вауер, 1895).

Обратимся к рисунку 10, иллюстрирующему нашу модель дрейфа СМП, на которой основан прогноз его местоположений. При обсуждении модели дрейфа магнитных полюсов будем пользоваться нижеследующим определением. Магнитный полюс - условная точка на земной поверхности, в которой равна нулю горизонтальная компонента магнитного поля Земли. Если по какой-то причине в двух точках [1] и [2], где горизонтальные компоненты магнитного поля Земли ( $H$ -компоненты) имеют противоположные направления, их величина меняется, - положение точки, где эти величины уравниваются друг друга ( $H = 0$ ), - меняется. При этом магнитный полюс перемещается между этими точками. Можно ли предсказать, в какой точке окажется магнитный полюс в будущем? По-видимому, можно, если в магнитном поле Земли, по крайней мере, в районе полюса, не наблюдается резких неоднородностей: как пространственных, так и временных (к которым, в частности, относятся и джерки).

Магнитные обсерватории ведут регулярное наблюдение за вариацией величин компонент магнитного поля Земли. Наиболее близки к СМП две обсерватории: Резольют Бей в Канаде и Мыс Челюскин – в России (рис. 10). Контролируя величины  $H$ -компонент на этих обсерваториях при условии, что характер их изменения вполне логичен, можно предсказать местоположение СМП в будущем. Этот прием использовался при прогнозе положения СМП в 1994 (Кузнецов, 1996) и в 2007 (показано на рис. 10). На нем изображены переменные во времени (1973 – 2010 г.г.) составляющие  $H$ -компонент, измеренные на этих обсерваториях  $H_1(t)$  и  $H_2(t)$ , а также их разность  $\Delta H = H_1(t) - H_2(t)$ . Вектора  $H$ -компонент на этих обсерваториях направлены навстречу друг другу. К примеру, значения  $H$ -компонент на этих обсерваториях: Резольют-Бей (1989)  $H_1 = 1041$  нТл; Мыс Челюскин (1990)  $H_2 = 3160$  нТл.

Для упрощения модели примем, что в 1984 г. разность между их величинами равна нулю:  $H_1 - H_2 = 0$ , и в дальнейшем будем рассматривать только переменную часть этих величин. Для удобства представления, разность между переменными составляющими величин  $H$ -компонент (кривая 3):  $\Delta H = H_1 - H_2 + k$ , где  $k = -400$  нТл.

Предположим, что путь, проходящий СМП  $L(t)$ , линейно связан с  $\Delta H(t)$ :  $L(t) \sim \Delta H(t)$ . Рассмотрим линейный участок дрейфа СМП (рис. 10), примем:  $L = 0$ , для СМП-1973. Принятые предположения позволяют получить зависимость:  $L(t)$ (км) – кривая 3 на рис. 14-20-а. В принципе существуют две возможности поведения  $H$ -компонент, регистрируемых на обсерваториях Мыс Челюскин и Резольют Бей. Это либо замедление дрейфа СМП примерно в 2000 и её снижение до нуля в 1580. В этом случае дрейф СМП имеет периодический характер. Если бы, к примеру, величина  $H$ -компоненты в районе обсерватории Мыс Челюскин  $H_2(t)$  начнет возрастать, а на обсерватории Резольют Бей  $H_1(t)$  – уменьшаться, то, в принципе, может оказаться возможной ситуация, когда скорости увеличения  $H$ -компонент на обеих обсерваториях окажутся равными и  $\Delta H = 0$ . В такой ситуации полюс остановится и может начать двигаться в обратном направлении. Существует вероятность того, что это произойдет именно в точке 2140 (1580). В этом случае дрейф СМП имеет колебательный характер. Если этого не произойдет и  $H_2(t)$  будет продолжать уменьшаться, а  $H_1(t)$  – возрастать как это видно из рис. 10), СМП может «проскочить» точку 1580 (2140), и устремиться навстречу с ЮМП. В этом случае существует вероятность того, что на Земле началась инверсия, либо очередной экскурс.

Последнее наблюдение на этих обсерваториях известны до 2007 г. Последнее измерения положения СМП производилось группой Л. Ньюитта в мае 2007. Прогноз положения СМП-2007, полученный по анализу данных обсерваторий ( $120^\circ\text{W}$ ;  $84^\circ 10'\text{N}$ ) практически совпал с измеренным местоположением полюса ( $123.44^\circ\text{W}$ ;  $84.01^\circ\text{N}$ ). Рисунок 10 позволяет оценить, - насколько продвинется полюс к 2010 году: полюс может пойти за три года расстояние в 200 км, скорость дрейфа СМП вырастет до 70 км/год. Очевидно, что, если ситуация не изменится, полюс к 2015 – 2020 гг. пересечет меридиан  $180^\circ$  и перейдет в восточное полушарие. Двигаясь на юг, он может достичь положения ЮМП примерно к 2400 году. *Это означает, что в наше время происходит инверсия, или экскурс.*

**Южный магнитный полюс.** Модель дрейфа южного магнитного полюса (ЮМП) аналогична модели дрейфа СМП. Как и раньше, рассматриваемые в модели источники будем представлять диполями. Допустим, что мы имеем два диполя интенсивностью  $A$  и  $B$ , находящихся на расстоянии  $x$  (в географических градусах) один от другого. Наша задача состоит в том, чтобы найти расстояние  $k$  (внутри отрезка  $x$ ), показывающее положение МП. Условие равенства нулю горизонтальных компонент источников можно записать в следующем виде (Кузнецов, 1998-б):

$$A \cos(\pi/2 + k) + B \cos\{\pi/2 + (x - k)\} = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4):  $c \operatorname{tg} k = (A/B + \cos x)/\sin x$ . Если:  $A = B$ , то:  $k = x/2$ ; если  $A = 0$ , то:  $k = x$ ; если  $B = 0$ , то:  $k = 0$ . Так как  $x \ll \pi/2$  (т.е. источники расположены один относительно другого ближе, чем  $90$  географических градусов), то для представления наших функций вместо тригонометрических кривых можно использовать наклонные прямые, пересекающие горизонтальную ось в точках расположения источников  $A$  и  $B$ . Представим себе, что источник  $A$  соответствует аномалии, а  $B$  - дипольному основному полю. Если их интенсивности равны, то местоположение МП:  $k = x/2$ . Допустим, что  $A$  не меняется со временем, а  $B$  - уменьшается. Уменьшение интенсивности источника дипольного поля вызовет смещение МП влево. В точках 1,  $A$  и 2, в результате этого уменьшения,  $H$ -компонента поля уменьшится. Уменьшится она и в точке 5, а в точках 3 и 4 - увеличится. В точке  $B$ , как следует из нашей схемы, величина  $H$ -компоненты останется без изменения. Допустим, что ЮМП действительно дрейфует в направлении от дипольного источника (интенсивность которого, как известно, убывает со скоростью 5%

за 100 лет), к глобальной магнитной Антарктической (Южной) аномалии. Тогда, в этом регионе должна наблюдаться выявленная нами особенность: уменьшение величины  $H$ -компоненты “левее” и “правее” МП, увеличение ее в области, примыкающей к МП и отсутствие вариации  $H$ -компоненты в районе положения дипольного, основного поля.

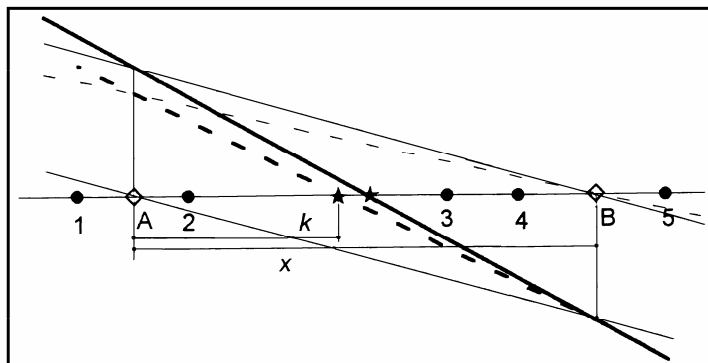


Рис. 13. Схема дрейфа южного магнитного полюса (ЮМП).  $H$ -компоненты поля изображены прямыми. А и В – источники поля, 1 – 5 – точки наблюдений. Звездочка – ЮМП.

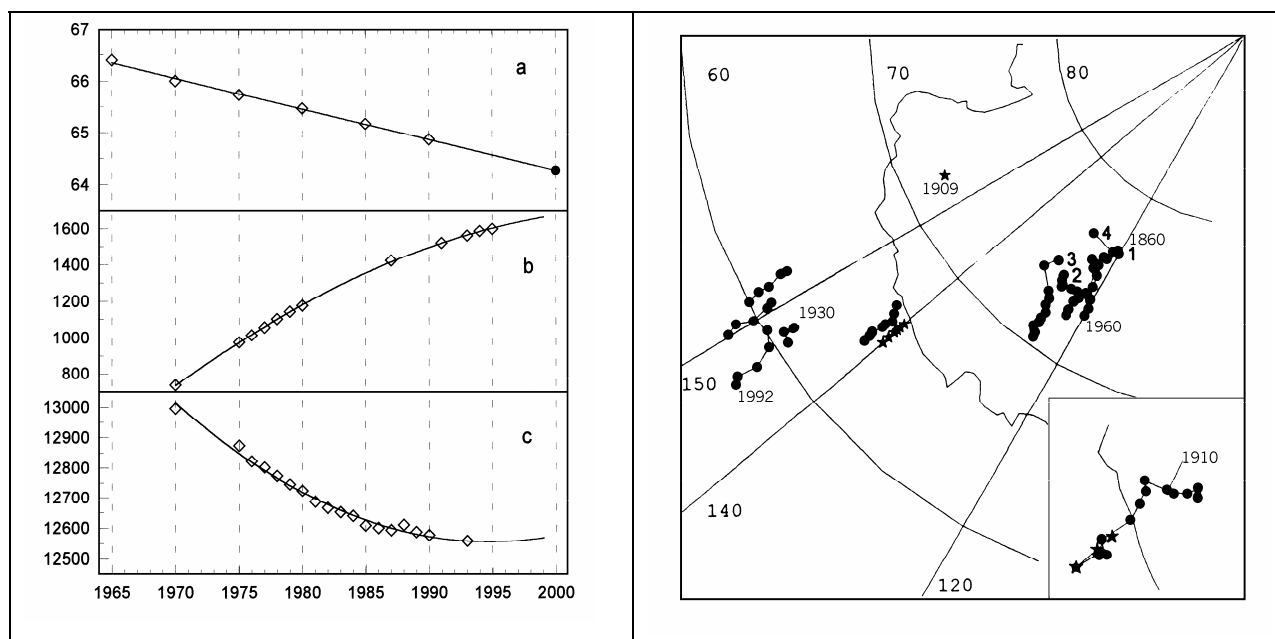


Рис. 14. Прогноз положения широты ЮМП - **a**, изменение во времени интенсивности  $H$ -компоненты на обсерваториях Dumont d'Urville - **b** и Масквагье - **c**, показывают плавный ход этого параметра.

Рис. 15. Изменение координат ЮМП (с 1965 по 1990 г.г.) и ВМП в течение периода работы обсерваторий (1-9 на рис. и в табл. 4). Звездочка с координатами  $72^{\circ}$  S и  $155^{\circ}$  E - положение ЮМП, определенное в 1909 г. во время экспедиции Шеклтона.

С целью проверки этого предположения, были исследованы временные зависимости  $H$ -компонент на 16 магнитных обсерваториях, расположенных в Австралии, Новой Зеландии, Антарктиде и на островах, ближайших к этим материкам, приведенные в (Головков и др. 1993). Рисунок 13 показывает пространственное распределение характера изменения величины  $H$ -компоненты поля. Проецируя данные обсерваторий на  $140^{\circ}$  E

меридиан, легко видеть, что область, в которой  $H$ -компонента возрастает, соответствует примерно  $65^\circ - 85^\circ S$ . В районе  $85^\circ - 90^\circ S$  величина  $H$ -компоненты поля постоянна. В других районах:  $< 65^\circ$  и  $> 90^\circ$  (см. рис. 15) - поле уменьшается. Замеченная особенность поведения  $H$ -компоненты поля в пространстве и во времени подтверждает нашу модель. (Знак " $> 90^\circ$ " надо понимать условно, т.к. широты, большей, чем  $90^\circ$ , - быть не может).

Из рис. 15 видно, что и ВМП, и ЮМП движутся вдоль меридианов на север. На рисунке отдельной звездочкой с координатами  $72^\circ S$  и  $155^\circ E$  изображено положение ЮМП определенное в 1909 во время экспедиции Шеклтона (Маусон). Из рисунка видно, что виртуальные полюса явно группируются в две области. Одна, тяготеющая к  $120^\circ$ -меридиану, принадлежит к обсерваториям Новой Зеландии и Австралии. Другая группа ВМП, расположенная вблизи  $150^\circ$ -меридиана, показывает ВМП обсерваторий Антарктиды. Виртуальные полюса, определенные по данным обсерватории Дюмон д'Юрвиль, располагаются вблизи ЮМП.

Рисунок 15 демонстрирует, что ЮМП находится примерно посередине между этими областями, отстоя от каждой на  $8.5^\circ$ . Из анализа характера движения австралийских и новозеландских ВМП следует, что примерно в 1920 произошло изменение направления движения ЮМП. Южный полюс отклонился от первоначального направления дрейфа к востоку на 2-3 градуса, а затем вернулся к прежнему, северному направлению дрейфа вдоль меридиана.

Хорошее совпадение между направлением и величинами скоростей дрейфа ЮМП и ВМП дает основание путем простого геометрического преобразования получить возможный путь дрейфа ЮМП (см. вставку внизу на рис.15) начиная с 1860 года (года начала работы обсерватории Туланги). Такое "восстановление" пути дрейфа ЮМП представляется автору вполне обоснованным. Однако в этом случае оказывается, что измерение положения ЮМП, выполненное участниками экспедиции Э. Шеклтона в 1909 (отдельная звездочка на рисунке) году, отстоит от определенного нами положения ЮМП в 1910 г. примерно на 500 км. Могли ли авторы этого определения так ошибиться? В пользу этого и справедливости нашей оценки, приведем еще один достаточно важный на наш взгляд аргумент. Если бы южный магнитный полюс действительно находился в 1909 году там, где его обнаружил профессор Моусон, то скорость его дрейфа за 50 лет (с 1909 по 1960) была бы не 6 км/год (как сейчас), а примерно в 2 - 3 раза быстрее. Такое "ускорение" движения ЮМП обязательно нашло бы отражение в данных магнитных обсерваторий Австралии и Новой Зеландии, чего реально не наблюдается.

Попытаемся восстановить характер дрейфа ЮМП, по крайней мере, за последние 100 лет. Воспользуемся для этого данными обсерватории Туланги и предположим, что изменение величины  $H$ -компоненты прямо связано с величиной и направлением скорости дрейфа ЮМП ( $v_{др} \sim dH/dt$ ). Известно, что в 1860 г. скорость дрейфа полюса уменьшалась до нуля, а в 1920-30 г.г. она даже меняла знак. Эти факты не противоречат нашей модели, наоборот, находят в ней простое объяснение. Для этого достаточно того, чтобы по какой-либо причине изменился характер вариации величины одного (или обоих) источников поля: аномалии, либо основного поля. Ход зависимости скорости дрейфа ЮМП показывает, что наша оценка местоположения ЮМП-99, сделанная выше, правильна. По-видимому, Бартон и Ньюитт, восстанавливая картину дрейфа ЮМП, были не совсем точны.

В заключение оценим географическое положение источников: дипольного (ДИ) и ГМА. Очевидно, что они близки к  $140^\circ E$ -меридиану. Из нашей модели следует, что ДИ должен находиться в области, где  $H$ -компонента не меняется. Это происходит примерно на  $85^\circ - 90^\circ S$ . "Выберем" координату ДИ =  $85^\circ S$ . Как оценить положение источника ГМА? Воспользуемся правилом, согласно которому магнитное поле двух источников выглядит, - как от одного, если их интенсивности различаются меньше чем в 0.67, а их эпицентры отстоят друг от друга меньше чем на  $40^\circ$  (Knapp, 1955).

Аномалия “Южный полюс” обычно представляется как следствие одного источника - ДИ. По нашей модели она “обязана” аддитивному сложению интенсивностей двух источников: ДИ и ГМА. Согласно модели, интенсивности обоих источников соизмеримы. Все это дает основание предположить, что расстояние между ними может оказаться порядка  $35^\circ$  (т. е.  $< 40^\circ$ ). В этом случае положение источника ГМА будет соответствовать примерно  $50^\circ S$ . В настоящее время ЮМП дрейфует в районе  $65^\circ$ . Это может говорить, в рамках наших предположений и оценок, о том, что интенсивности ДИ/ГМА соотносятся как 0.75 или, примерно, 30 и 37 мкТл, соответственно.

**Дрейф полюсов в момент инверсии.** Как мы отмечали выше, полюса дрейфуют в момент инверсии по вполне определенным траекториям. Выяснилось, что в момент инверсии виртуальные геомагнитные полюса (ВГП) движутся не по случайным траекториям, а совсем наоборот, направления их дрейфа вполне однозначны. Выделяются всего две трассы дрейфа ВГП. Одна из них “проходит” через Центральную Азию и Австралию, другая, через обе Америки (см. рис. 16). Обе трассы сравнительно близки к  $90^\circ$ -меридиану в западном и восточном полушариях.

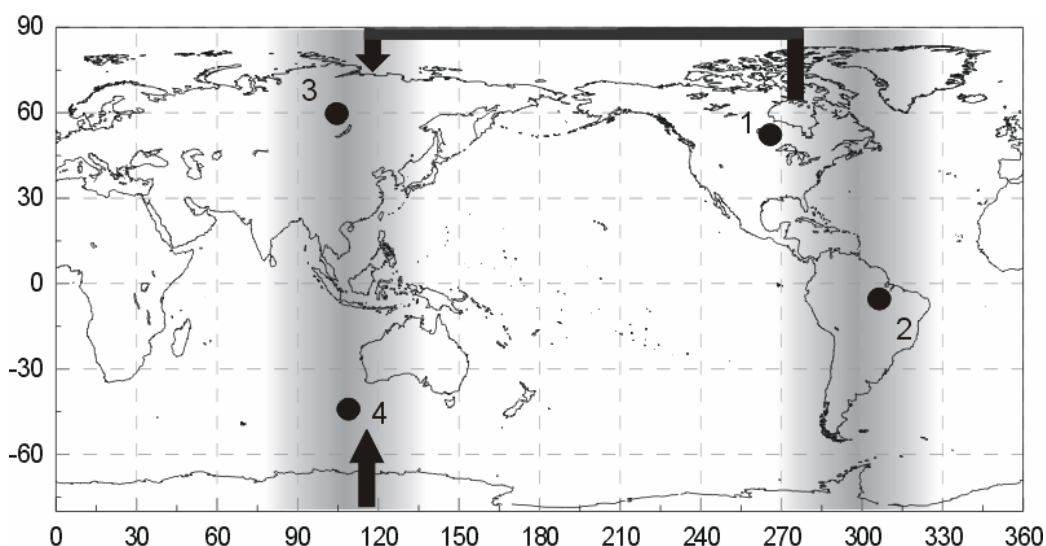


Рис. 16. Пути дрейфа магнитного полюса во время инверсий (Constable, 1992; Kuznetsov, 1999), 1-4 ГМА.

### Магнитное поле планет и спутников.

Продвижение в изучении магнитных полей планет и спутников достигнуто благодаря успехам космической технологии. Начало исследованиям было положено измерениями магнитного поля Луны, проведенными космическим аппаратом Луна-2 (Долгинов, 1982). За минувшие годы были измерены магнитные поля планет: Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, и спутников: Луны, Ио, Ганимеда и Титана. Поразительным открытием в этом цикле работ было обнаружение следов магнитного поля на спутниках планет-гигантов. Похоже, завершился более чем двадцатилетний спор между нашими (Долгинов) и американскими (Russell) магнитологами о том, имеется ли на Марсе дипольное поле, или оно только осталось в горных породах. Последнюю “точку” в этом споре поставил американский космический аппарат “Марс-Глобал-Сервейер”, который вышел на орбиту вокруг Марса в сентябре 1997 г. и получил убедительные данные о существовании в марсианской коре остаточной намагниченности - “вмороженной” памяти о когда-то существовавшем магнитном поле.

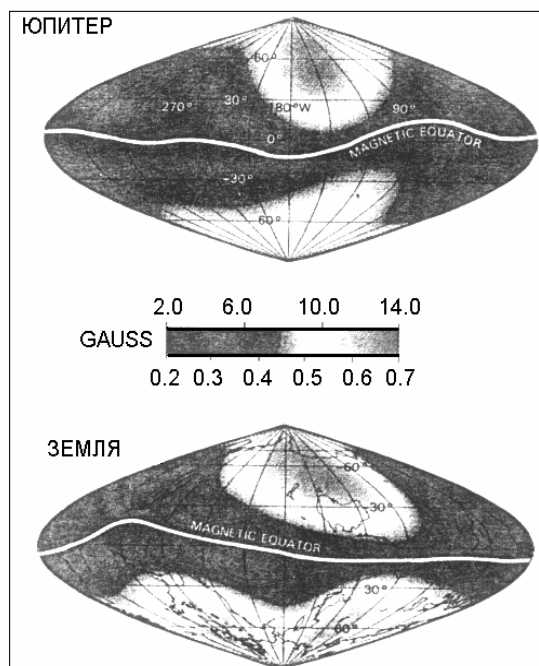


Рис. 17. Морфология магнитного поля Юпитера и Земли.

К сожалению, такой ясности нет с магнитным полем Венеры, не удастся обнаружить каких-либо убедительных данных о результатах его измерения. То, что на Венере нет дипольного поля не вызывает сомнений, но было ли оно раньше? Ответ на этот вопрос весьма интересен в контексте нашей модели. Если его никогда не было, значит можно оценить минимально допустимую величину поля  $B_0$ , которое в значительной степени определяется скоростью вращения планеты. Тем интереснее, что Меркурий, который вращается всего в четыре раза быстрее Венеры, дипольным полем обладает. Если нет дипольного поля, но есть палеополе, то не происходит ли сейчас на Венере инверсия, или вещество внутреннего ядра Венеры уже релаксировало и генерация поля прекратилась?

Одна из последних сенсаций в области изучения магнитного поля спутников, это обнаружение магнитного поля на спутниках Юпитера во время посещения его окрестностей космической станцией Galileo. Особую дискуссию вызвало наличие магнитного поля на Ганимеде (Stevenson, 1997; Cray, Bagenal, 1998). В этом плане обсуждались две возможности: Первая, это намагничивание горных пород Ганимеда магнитным полем Юпитера в более ранние времена, когда Ганимед был значительно ближе к Юпитеру, чем в настоящее время и, вторая возможность, это динамо в ядре Ганимеда. Однако, по данным о плотности ядра, на Ганимеде не может быть жидкого железного ядра, а оценки намагниченности пород от магнитного поля Юпитера дают только 5% от требуемой величины палеополя Ганимеда. Магнитологи высказывают и такие «фантастические» идеи относительно возможности генерации дипольного магнитного поля на Ганимеде в настоящее время. В любом случае, современные модели геомагнетизма не находят однозначного ответа на вопрос о магнитном поле на Ганимеде. Заметим, что эта задача очень близка и настолько же неразрешима, как и проблема генерации магнитного поля Луны, активно обсуждаемая учеными 20 и более лет тому назад (Runcorn, 1975).

Выше мы упоминали о том, что морфология геомагнитного поля весьма напоминает магнитное поле Юпитера (рис.17). Для достижения большего эффекта, картина земного поля перевернута и вверху находится Южный полюс, а интенсивность поля Юпитера примерно в 10 раз выше, чем у Земли, однако общность этих проекций поразительна. Трудно себе представить, что Природа “выбрала” различные способы и

механизмы для достижения таких похожих результатов. Еще раз хочется обратиться к Ньютону и вспомнить, что “Природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей”. В этом плане рассмотрим те данные о магнитных полях планет и спутников, которые известны на сегодня. Эти данные приведены в таблице 5 в первом столбце, во втором они же относительно геомагнитного поля. В третьем столбце приведены данные по скорости осевого вращения планет и спутников и их средний радиус. Эти данные потребуются нам для того, чтобы оценить, очень грубо, по порядку величин, возможное значение магнитного поля по нашей модели (н.м.).

Таблица 5

Планета, спутник	$B$ , (Гс)	Поле, отн. Зем.	$T$ , сут	$R$ , км	Поле (модель)
Меркурий	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	59	2425	0.04
Венера	$< 310^{-5}$	0	243	6070	0.004
Земля	0,31	1	1	6378	1
Марс	$< 10^{-4}$	0	1	3395	2
Юпитер	4.2	10	0.4	71300	0.2
Сатурн	0.21	1	0.43	60100	0.25
Уран	0.25	1	0.7	24500	0.4
Луна	$< 10^{-5}$	0	27.3	1738	0.13
Ио	-	0	1.7	1810	2
Ганимед	-	0	7	2600	0.35

В заключение сформулируем основную идею геомагнетизма в модели горячей Земли:

- Земля рассматривается нами как саморегулирующаяся термодинамическая система.
- Процессы саморегулирования Земли происходят в F-слое. Здесь реализуются: фазовый переход (ФП) первого рода (конденсация-испарение), механизм образования и разделения электрических зарядов и образования двойного электрического слоя (ДЭС) и радиального электрического поля  $E_R$ .
- Суточное вращение ДЭС приводит к генерации слабого дипольного поля  $B_o$ . Это поле усиливается за счет холловского (или динамо) механизма, возникающего в области ФП под действием ортогональных  $E_R$  и  $B_o$ .
- Температура F-слоя за счет протекания процессов тепло и массопереноса поддерживается постоянной. В слое возникают: - стационарные вихри (глобальные магнитные аномалии), - вихри, движущиеся вдоль поверхности F-слоя в западном направлении (фокусы векового хода) (и те, и другие - вихри Россби), конвективные механизмы, приводящие к охлаждению или нагреву слоя, изменения режима ФП (переход от преимущества конденсации над испарением и наоборот) и т.п.
- Эти гидродинамические процессы происходят в хорошо проводящей двухфазной среде в “присутствии” дипольного поля. Возможны явления “вмораживания” поля в проводящую среду и “маркировки” этих процессов на земной поверхности, как известных явлений геомагнетизма, таких как глобальные магнитные аномалии, фокусы векового хода, джерки, экскурсы и инверсии.
- Модель генерации геомагнитного поля находит простое и естественное объяснение дрейфу магнитных полюсов.