

## ДРЕЙФ СЕВЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЮСА: ПРОГНОЗ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

В.В.Кузнецов

Предложена модель дрейфа северного магнитного полюса (СМП), основанная на развиваемой автором концепции горячей Земли и, следующей из этой концепции схемы генерации геомагнитного поля. Модель учитывает величину градиента геомагнитного поля в районе СМП ( $dH/dL$ ) и его временную вариацию ( $dH/dt$ ). Скорость дрейфа СМП  $V = (dH/dt)/(dH/dL) = dL/dt$ . Величина  $dH/dL$  оценивается по магнитной карте, а  $dH/dt$  - по данным двух полярных обсерваторий Resolute Bay (Canada) and Cape Chelyskin (Russia).

Локальные измерения пространственной и временной изменчивости магнитных полюсов Земли были включены в Программу Международного Полярного Года 2007-2008. Программа включала прямые измерения Северного и Южного Магнитных полюсов (СМП и ЮМП), а также развитие математической модели необходимой для прогноза положения магнитного полюса. Эта часть Программы была поручена автору статьи. На основе данных полученных российской и канадской обсерваториями, автором были предсказаны местоположения СМП в 2007, 2010 и 2015 годах. Следуя методики, разработанной автором можно прогнозировать год, когда СМП перейдет в восточное полушарие ( $E = 180^\circ$ ). Это событие должно произойти в 2018.

Координаты СМП в 2007 ( $120^\circ W$ ;  $84^\circ 10' N$ ), следующие из моей модели практически совпадают ( $120.72^\circ W$ ;  $83.95^\circ N$ ) с координатами определенными прямыми измерениями местоположения СМП в апреле 2007 (Newitt и др., 2009). Ранее автор использовал свой метод, для того, чтобы предсказать местоположение СМП в 1994 (Кузнецов, 1996), и этот прогноз был весьма близок к положению полюса, определенного Лари Ньюиттом в 1994.

Автором в течение ряда лет разрабатывается концепция горячей расширяющейся Земли и, как следствие этой концепции, - принципиально новая модель генерации геомагнитного поля. Согласно концепции, на границе внутреннего ядра Земли (в F-слое) реализуется фазовый переход (ФП) первого рода. Выделение теплоты ФП (испарение-конденсация) является источником энергии генерации геомагнитного поля. Переменный во времени характер работы ФП, который можно рассматривать как фликкер-шум, приводит к смене полярности поля, т.е. к инверсиям, экскурсам и джеркам. Около границ F-слоя в процессе прохождения ФП образуются электрические заряды, и происходит их разделение с образованием двойного электрического слоя (ДЭС) (Кузнецов, 2008).

Суточное вращение ДЭС ведет к возникновению затравочного дипольного магнитного поля, которое усиливается за счет механизма генерации типа холловского динамо, возникающего за счёт гидродинамического переноса хорошо проводящего вещества F-слоя в дипольном магнитном поле. При этом возникает азимутальное электрическое поле различной полярности, вызывающее токи, протекающие по границам слоя в противоположных направлениях.

В F-слое с градиентом температуры и гидродинамическим переносом типа геострофического ветра генерируются долгоживущие вихри, подобные вихрям Россби, наблюдаемым в атмосферах Юпитера и Сатурна. Эти вихри создают дополнительное к дипольному магнитному полю – поле глобальных магнитных аномалий. Таким образом, геомагнитное поле оказывается результатом сложения полей пяти диполей (токовых колец): основного осевого диполя и четырех радиальных диполей – аномалий. В рамках этой модели находят непротиворечивое объяснение все особенности магнитного поля Земли, других планет и спутников, в том числе и дрейф магнитных полюсов (Кузнецов, 2008).

Возникает вопрос, насколько идея генерации геомагнитного поля в F-слое, т.е. на радиусе 0.2 от радиуса Земли противоречит наблюдаемым данным? Оказывается, совсем наоборот. Так, например, в цикле работ Олдриджа (Alldredge, Hurwitz, 1964; Alldridge, Stearns, 1969; Alldridge, 1980; Alldridge, 1987), а так же в работе (Peddie, Zunde, 1987) проводилось компьютерное моделирование геомагнитного поля набором токовых колец (current-loop). Подбиралось оптимальное число колец и радиус их расположения. Во всех этих исследованиях был получен однозначный результат: источник геомагнитного поля располагается на радиусе  $x = 0.2 R$ , где  $R$  – радиус Земли.

В подтверждение теоретической модели генерации геомагнитного поля в F-слое нами производилось численное моделирование источника поля состоящего из пяти токовых колец: одного осевого и четырех радиальных. На рис. 1 показаны результаты моделирования (Ботвиновский, 2000).

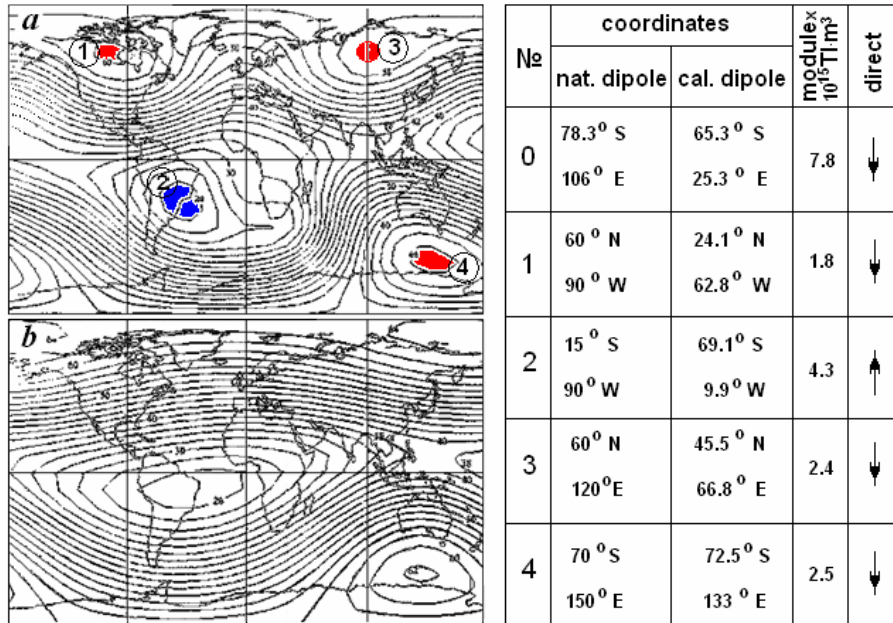


Рис. 1. Модуль геомагнитного поля образованный в результате суммирования пяти диполей: основного (0), диполей аномалий: Канадской (1), Бразильской (2), Сибирской (3), Антарктической (4) – *a*. Модуль геомагнитного поля центрального диполя (0) – *b*. Справа: таблица координат магнитных диполей – токовых колец - координат источников диполей на сфере  $0.2 R_E$ , величин модулей диполей и их направления (Ботвиновский, 2000).

В нашей модели, “токи” текут в противоположных направлениях не по всей поверхности внутреннего ядра, а сосредоточены в двух цилиндрах, радиусом  $R_G$  и  $(R_G + \Delta R)$ ; высотой  $A$  и толщиной стенки  $\delta$ , в экваториальной области. Это следует из нашей модели, т.к. в оценках мы принимали, что  $j_\omega$  и, соответственно,  $B^*$ , являются функциями  $R_G$ . Если рассмотреть нашу модель применительно к более высоким широтам, то вместо  $R_G$  необходимо подставить  $R_G \cos \varphi$ . Это означает, что на полюсах, где  $\varphi = 90^\circ$ , наша модель заведомо “не работает” и вся наша “токовая” система “стягивается” в тонкие цилиндрические кольца ( $\delta < A$ ), расположенные на экваторе (рис. 2-а).

Воспользуемся данными о стандартном геомагнитном поле. Переменная часть величины Н-компоненты (в микротеслах - мкТл), измеренная в плоскости экватора

представлена на рис. 2-б точками. Среднее значение  $H$ -компоненты на экваторе составляет примерно 32 мкТл. Полученную функцию  $H(\varphi)$  можно разложить на две гармоники: первую и вторую (рис. 2-б). Напомним, что согласно нашей модели генерации геомагнитного поля, в плоскости экватора должно находиться дифференциальное токовое кольцо. Если кольцо симметрично, то не должно наблюдаться переменной (по углу) части  $H$ -компоненты. Одной из причин появления этого эффекта могла бы быть некоторая несоосность колец. Например, смещение одного из них относительно другого может привести к пространственной вариации величины  $H$ -компоненты ( $\Delta H$ ), что и наблюдается в действительности. Так как максимум вариации  $H$ -компоненты приходится примерно на  $(120-135)^\circ\text{E}$ , то для реализации этого явления, внутренний круг следует сместить в противоположную сторону, - к  $300^\circ\text{E}$ . Величина смещения  $x$  находится из пропорции:  $\Delta H/H \sim x/\Delta R$  ( $x \approx 1/5 \Delta R$ , около 20 км). Таким образом, первая гармоника (рис. 2-а) определит в плоскости экватора смещение внутреннего круга (2), а вторая - отклонения от этого круга (2) в соответствии с величинами и фазами второй гармоники.

Отметим ещё одно удивительное совпадение. Для получения соответствия модели реальному полю, пришлось сместить внутреннее кольцо токовой системы (рис. 2-с) в направлении к  $300^\circ\text{E}$ . Обратим внимание на то, что для наилучшего описания анизотропии внутреннего ядра, полученного сейсмическими методами, К.С. Creager (1992), так же как и мы, сместил центр анизотропии в сторону  $300^\circ\text{E}$ . Этот факт говорит в пользу нашей модели.

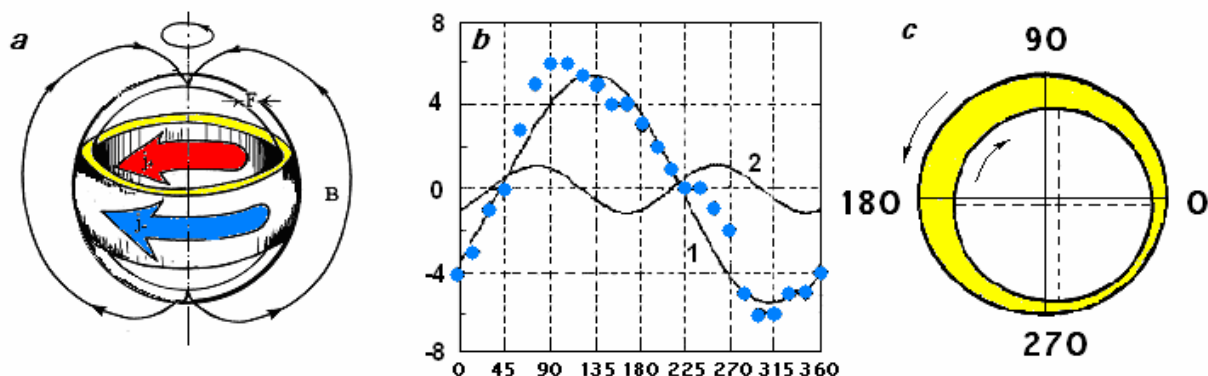


Рис. 2. а - Схема токовых колец. Обозначения в тексте. б - Связь анизотропии внутреннего ядра и морфологии геомагнитного поля. Точки – переменная часть  $H$  компоненты в плоскости экватора. 1 – первая и 2 – вторая гармоники. с – поперечное сечение F-слоя. с - расположение внутренней и внешней границ F-слоя

Известно, что магнитные полюса дрейфуют в момент инверсии по вполне определенным траекториям (Кузнецов, 2008). 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. 3). Обе трассы сравнительно близки к  $90^\circ$ -меридиану в западном и восточном полушариях. Многие работы магнитологов посвящены исследованиям направлений дрейфа ВГП, рассматриваются возможные модели дрейфа, естественно, исходя из концепции динамо механизма генерации магнитного поля Земли. Поток статей на эту тему не прекращается и количество предлагаемых моделей возрастает. Недавно вышла в свет вторая редакция книги (Jacobs, 1994), целиком

посвященной этой проблеме. Это означает только то, что проблема интересует научное сообщество и не находит пока “разумного” решения.

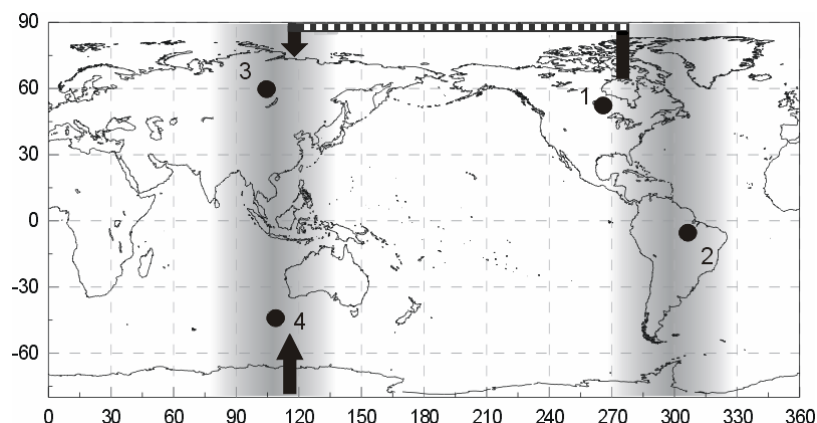


Рис. 3. «Следы» дрейфа виртуальных магнитных полюсов в моменты инверсий геомагнитного поля - полосы. Черные токи – глобальные магнитные аномалии.

Обратим внимание на то, как происходил дрейф СМП в течение последних 100 лет и, особенно, в самое последнее время. Видно, что СМП дрейфует вдоль линии, практически соединяющей две обсерватории Резолют 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. 4).

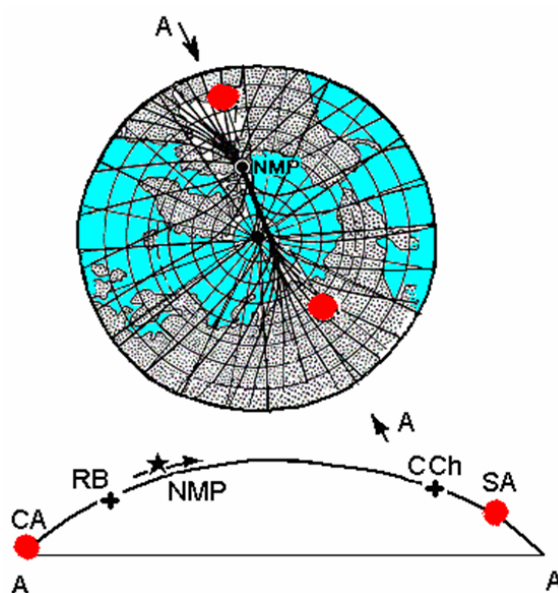


Рис. 4. Вверху: структура силовых линий геомагнитного поля. Внизу схема по AA: CA – Канадская аномалия, RB – обсерватория Resolute Bay, NMP – Северный магнитный Полюс, CCh – обсерватория Cape Chelyskin, SA – Сибирская аномалия.

Магнитные аномалии, инверсии, экскурсы, джерки и фокусы векового хода, это “особые точки” геомагнетизма, в которых это явление проявляется наиболее ярко. 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. 4). Хоуп считал, что СМП перемещается по линии, соединяющей обе аномалии. Идеи Хоупа не нашли должного внимания среди магнитологов и были забыты.

Около тридцати лет тому 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, 2008). 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). Очевидно, что прогнозировать дрейф магнитных полюсов можно только в том случае, если измеряемые элементы геомагнитного поля, такие как склонение и наклонение показывают определенную логичность своего «поведения».

Величины склонения и наклонения измерялись обсерваторией в Лондоне, начиная с 1540 года. Было отмечено, что в течение всего времени наблюдений эти параметры непрерывно изменялись (рис. 5-а). На рис. 5-а представлены сглаженные результаты наблюдений за изменениями  $I$  и  $D$ , опубликованные впервые Бауэром для Лондона [Baueg, 1895], и в последствии повторенные во многих монографиях по геомагнетизму.

Зная величины  $I$  и  $D$ , можно определить положение виртуальных магнитных полюсов (ВМП) и сравнить изменение их положения с реальным дрейфом СМП. Рисунок показывает, что виртуальный северный магнитный полюс (ВСМП) в течение 450 лет дважды изменял направление своего дрейфа: в 1580 и 1860 годах.

Анализируя результаты наблюдений склонения и наклонения в Лондоне можно получить информацию о том, как в действительности перемещался СМП в течение последних 450 лет. Сравнение скоростей дрейфа ВСМП и СМП за последние 100 лет, показывает, что их скорости дрейфа оказываются очень близкими по величине и направлению, особенно в самые последние годы. Это обстоятельство позволяет предположить, что ВСМП повторяет дрейф СМП не только в 20 веке, т.е. в годы инструментальных измерений, но и за все предыдущие 450 лет. Если бы СМП реально двигался так, как это следует из рис. 5-а, то определение местоположения СМП, сделанное Дж. Россом, оказывается ошибочным (рис. 5-б), и в действительности СМП в 1831 году находился восточнее примерно на 100 км. Обратим внимание на то, что СМП, начиная с 1580 г. и по 1860 г., дрейфовал в направлении, обратном современному, - т.е. к югу. В пользу такого предположения говорит тот факт, что в данных Лондонской обсерватории нет подтверждения наличию резкого изменения скорости дрейфа СМП в промежутке времени между измерениями Росса и Амундсена. В 1860 году какая-то

причина вынудила СМП изменить направление своего дрейфа, развернуться и начать свой путь к северу. Рис. 5 -а дает возможность предположить, что СМП может «замкнуть» цикл длительностью в 560 лет примерно в 2140 году и вернуться в точку, в которой находился в 1580 г. Произойдет это, или нет, - покажут будущие наблюдения.

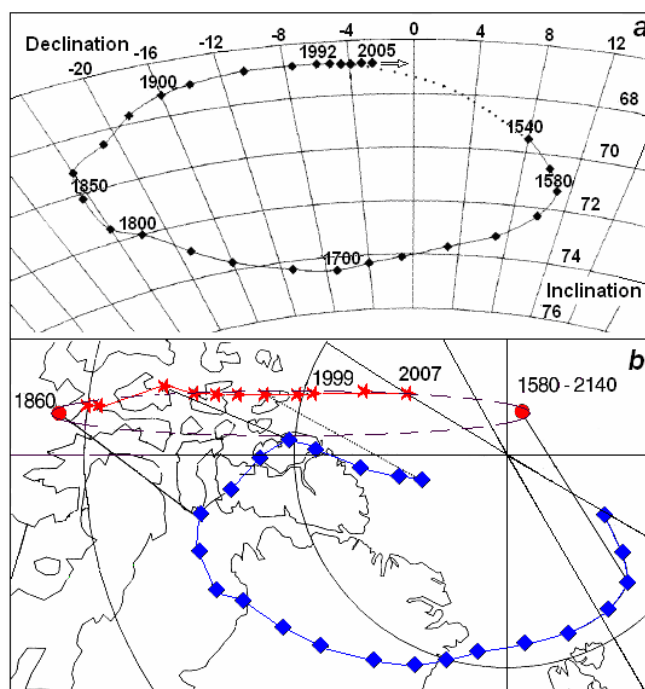


Рис. 5. *a* – изменения склонения ( $D$ ) и наклонения ( $I$ ) измеренные на Лондонской магнитной обсерватории [Bauer, 1895]; *b* – местоположение СМП (звезды) и виртуальные геомагнитные полюсы (ромбы), полученные по данным – *a*.

Анализируя этот рисунок, видно, что в 2000 г скорость дрейфа СМП должна быть самой большой, а в дальнейшем, – она должна уменьшаться, причем, таким образом, чтобы СМП остановился, развернулся в 2140 г и стал дрейфовать в обратном направлении. Таким образом, в течение последних 450 лет наблюдается определенная логика в характере дрейфа СМП. Так как скорость дрейфа СМП не стала уменьшаться после 2000, а, наоборот, продолжает расти, можно предположить, что характер его движения изменился и, похоже, СМП не будет разворачиваться в обратную сторону в 2140. **Имеется ли такая же логика дрейфа СМП в пространстве?**

Представим скорость дрейфа магнитного полюса как:  $V = dL/dt = (dH/dt) / (dH/dL)$ , где  $dH/dt$  изменение величины среднегодовой горизонтальной компоненты геомагнитного поля в районе магнитного полюса. Для полюсов СМП и ЮМП эта величина составляет  $\approx 40$  нТл/год. Пространственные градиенты  $H$ -компоненты геомагнитного поля ( $dH/dL$ ) в районах дрейфа полюсов значительно различаются:  $dH/dL$  в районе СМП  $\approx 1$  нТл/км; в районе ЮМП  $\approx 10$  нТл/км. Подстановка в формулу пространственных и временных градиентов поля  $H$ -компоненты показывает их совпадение с измеренными скоростями дрейфа магнитных полюсов. Полагая, что градиент поля  $dH/dL$  значительно не меняется в течение времени наблюдений за дрейфом полюса, для определения его местоположения - необходимо контролировать изменение  $dH/dt$ .

Суть модели прогноза положения магнитного полюса состоит именно в том, чтобы, используя особенность его дрейфа, контролировать  $dH/dt$  на ближайших к полюсу магнитных обсерваториях. Как известно СМП движется практически по прямой линии, соединяющей две обсерватории Резольют Бей (в Канаде) и Мыс Челюскин (в России), что

демонстрирует рис. 6-а. 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. Анализ дрейфа СМП как пространственный, так и временной показывает стабильность дрейфа СМП: он не меняет направления, а скорость его дрейфа, в течение времени наблюдения, – возрастает.

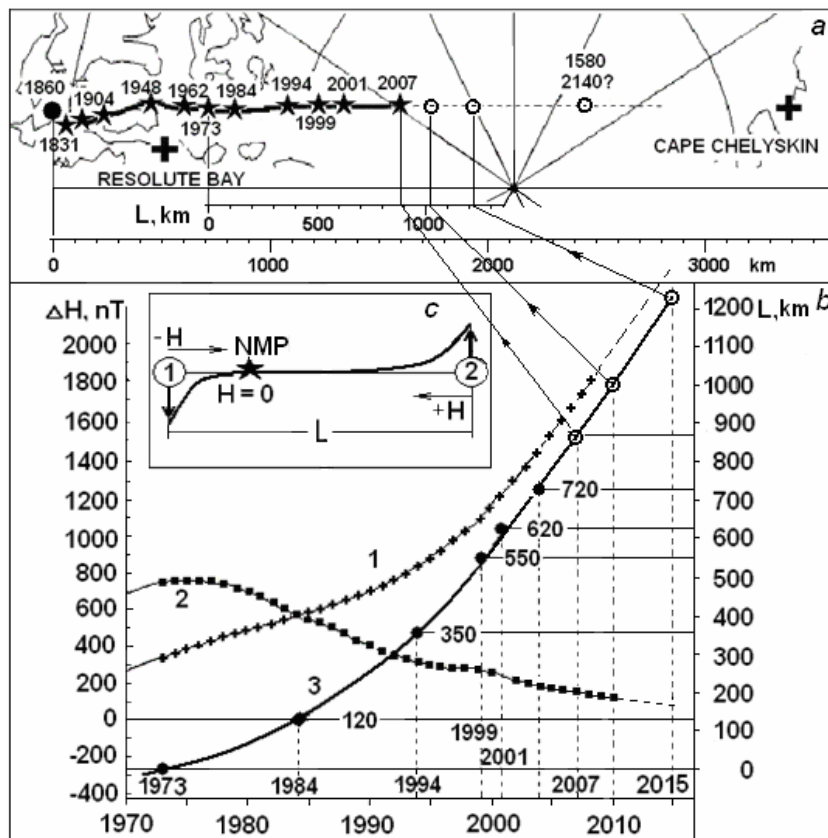


Рис. 6. *a* – Положения СМП: звездочки – измеренные, кружки – прогноз. Крестики – положения магнитных обсерваторий,  $L$  – расстояние (км) от точки СМП 1973; *b* –  $\Delta H$  вариации  $H$  компоненты: 1 – на станции Резольют Бей; 2 – на станции Мыс Челюскина. 3 – разность между величинами этих компонент- шкала слева ( $\Delta H$ , нТл), звездочки – положения СМП (2004 – прогноз). Шкала справа: расстояние СМП ( $L$ , км) от его местоположения в 1973 ( $L = 0$ ); *c* - схема дрейфа СМП (звездочка) между двумя источниками поля 1 и 2. – квазиисточниками  $H$ -компоненты геомагнитного поля.

Для определения координат положения СМП будем использовать эту особенность его дрейфа. Для оценки положения полюса необходимо определить расстояние  $\Delta L$ , на которое он может сместиться за время  $\Delta t$ . В течение этого времени горизонтальная компонента поля в районе СМП может измениться на величину  $\Delta H$ . Очевидно, что если в двух точках, расположенных на пути дрейфа СМП, по обе стороны от него,  $H$ -компоненты магнитного поля Земли направлены навстречу друг к другу, то полюс находится в той точке, где  $H = 0$  (см. вставку на рис. 6-с).

На рисунке 6-*b* приведены графики (1 и 2), показывающие вариации  $\Delta H$  в двух обсерваториях. Вычитая из вариации  $\Delta H$ , определенной по данным обсерватории Резольют Бей, аналогичную вариацию, полученную на обсерватории Мыс Челюскин, - получаем кривую 3, связанную, по нашей модели, с  $dL/dt$ . Для упрощения модели принимаем, что в 1984 разность между величинами  $\Delta H$  равна нулю:  $\Delta H = \Delta H_1 - \Delta H_2 = 0$ , и в дальнейшем

будем рассматривать только переменную часть этих величин. К примеру, значения  $H$ -компонент на обсерваториях: Резольют-Бей (1989)  $H_1 = 1041$  нТл; Мыс Челюскин (1990)  $H_2 = 3160$  нТл и т.д.

Ранее отмечалось, что путь, который проходит СМП  $L(t)$ , линейно связан с  $\Delta H(t)$ :  $L(t) \sim \Delta H(t)$ , примем:  $L = 0$ , для СМП-1973. Принятые предположения позволяют получить зависимость:  $L(t)$ (км) – кривая 3, правая вертикальная шкала на рисунке 6-b. Выбираем масштаб таким образом, чтобы отложенные на кривой 3 точки, соответствовали положениям СМП в соответствующие годы и показывали расстояние от СМП-1973, измеренное по карте, изображенной на верхней панели рисунка. Определим расстояние, которое должен пройти СМП к 2007, оно оказывается примерно равным 900 км. Откладываем это расстояние на карте дрейфа (верхняя панель) и определяем ориентировочные координаты СМП. Оказывается, что такой прогноз, в пределах точности, доступной для этого метода, практически совпадает с измерениями положения полюса.

Методика, используемая при предварительном прогнозе положения магнитных полюсов как северного, так и южного, проста и наглядна, но, по-видимому, недостаточно точна. Методика базируется на развиваемых автором представлениях о роли глобальных магнитных аномалий в дрейфе магнитных полюсов в периоды смены полярности геомагнитного поля [Kuznetsov, 1999]. Эта методика обсуждалась в [Кузнецов, 2006] где, основываясь на данных по изменению  $H$ -компонент, полученных до 2004 года, было высказано предположение, что возможны два варианта дальнейшего дрейфа СМП: либо – замедление скорости дрейфа до нулевой и повторение цикла, либо начало инверсии или экскурса ГМП. Появление новой информации на сайтах обсерваторий Резольют Бей и Мыс Челюскин позволяют склониться ко второму варианту, что может означать начало смены полярности геомагнитного поля.

#### Литература

- Ботвиновский В.В. Моделирование генератора главного магнитного поля Земли с помощью магнитных диполей и токовых контуров. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск. 2000.
- Кузнецов В.В. 1984. Физика Земли и солнечной системы (Модели образования и эволюции). Новосибирск: ИГГ. Вып. 639. 90 с.
- Кузнецов В.В. 1996. Положение Северного Магнитного Полюса в 1994. Докл. Акад. Наук, Т. 348, С.397-399.
- Kuznetsov V.V. 1999. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals, Phys. Earth Planet. Inter., 115, 173-179.
- Кузнецов В.В. 2006. Причина ускорения дрейфа северного магнитного полюса: джерк или инверсия? Геомагнетизм и Аэрономия Т.46, С. 266-273.
- Кузнецов В.В. 2008. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский. КамГУ.
- Allredge L.R., Hurwitz L. 1964. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. J. Geophys. Res. V. 69. P. 2631- 2636.
- Allredge, L.R., Stearns C.O. 1969. Dipole model of the sources of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. V. 74. P. 6583-6593.
- Allredge, L.R. 1980. Circular current loops, magnetic dipoles and spherical harmonic analyses. J. Geomag. Geoelectr. V. 32. P. 357-364.
- Allredge, L.R. 1987. Current loops fitted to geomagnetic model spherical harmonic coefficients. J. Geomag. Geoelectr. V. 39. P. 271-296.
- Bauer L.A. 1895. Beitrage zur Kenntnis des Wesens der Sakular-variation des Erdmagnetismus. Dissert. Univ. Berlin. 1895.



- Creager K.C. 1992. Anisotropy of the inner core from differential travel of the phases PKP and PKIKP. *Nature*. V. 356. P. 309-314.
- Jacobs J.A. 1994. *Reversals of the Earth's magnetic field*. Cambridge Univ. Press. New York. 346 p.
- Hope E.P. 1959. Geotectonics of the Arctic Ocean and the Great Arctic Magnetic Anomaly. *J. Geophys. Res.* V. 164. N. 4. P. 407-427.
- Korte M., Manda M. 2008. Magnetic poles and dipole tilt variation over the past decades to millennia. *Earth Planets Space*, 60, 937–948.
- Newitt L. R., Chulliat A., Orgeval J.-J. 2009. Location of the North Magnetic Pole in April 2007. *Earth Planets Space*, 61 (No. 6), 703-710.
- Peddie N.W., Zunde A.K. 1987. A model of geomagnetic secular variation for 1980-1983. *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 48. P. 324-329.