

# ПРИЧИНА УСКОРЕНИЯ ДРЕЙФА СЕВЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЮСА: ДЖЕРК ИЛИ ИНВЕРСИЯ?

В.В. Кузнецов

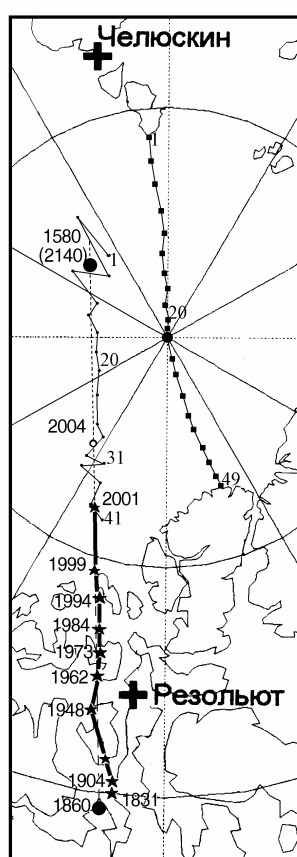
*Институт космофизики и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатка  
Институт геофизики СО РАН, Новосибирск  
[e-mail:vyk@ikir.kamchatka.ru](mailto:vyk@ikir.kamchatka.ru)*

В течение последних 20 – 30 лет скорость дрейфа Северного магнитного полюса (СМП) увеличилась почти в пять раз. В чём причина этого явления? Что это: регулярный циклический процесс, согласно которому СМП ранее дважды уже изменял направление своего дрейфа (в 1580 и 1860) и должен развернуться в очередной раз примерно в 2140 году, либо ускорение СМП связано с влиянием на этот процесс джерка-69, или ускорение СМП означает начало инверсии геомагнитного поля? Оба магнитных полюса, начиная с 1860 г, дрейфуют к северу (СМП – в Западном полушарии, а южный магнитный полюс (ЮМП) - в Восточном) навстречу друг другу. Оба полюса движутся вдоль трасс, характерных для перемещения виртуальных магнитных полюсов в момент инверсии. Скорость дрейфа ЮМП в течение времени инструментальных наблюдений несколько уменьшилась: от 8 км/год на начальном этапе до 4 км/год в настоящее время. Обсуждается возможная причина ускорения дрейфа СМП и замедления ЮМП. Показано, что положение СМП можно оценивать по изменению величин горизонтальных компонент геомагнитного поля, регистрируемых на обсерваториях, наиболее близко расположенных к СМП. Измерения положения СМП, которые могут быть проведены в течение ближайших 3-5 лет, помогут ответить на вопрос, продолжит ли СМП ускоряться, или он начнет замедляться. Обсуждается возможная взаимосвязь ускорения СМП и увеличения частоты джерков, а так же, могут ли эти факты свидетельствовать о начале инверсии.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Инструментальное определение координат положения северного магнитного полюса (СМП) было начато капитаном Россом в 1831 г, когда он оценил координаты СМП:  $70^{\circ} 5' N$  и  $96^{\circ} 46' W$ . 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 за 70 лет СМП переместился по направлению к Северному географическому полюсу в точку, отстоящую от первой всего на 50 км: (см. рис. 1). Этап современных наблюдений положений СМП начинается с измерений, проведенных канадским магнитологом Серсоном [Serson, 1981] в 1948 г. Наблюдения за дрейфом СМП ведутся сотрудниками канадской обсерватории Crescent [Newitt, Nablett, 1986; Newitt, Barton, 1996; Newitt et al., 2002] с периодичностью чаще, чем раз в 10 лет. 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. В [Newitt et al., 2002] сообщается об измерении в мае 2001 г. положения СМП, выполненного совместными усилиями канадских и французских магнитологов, в продолжение измерений, проведенных в 1999 году. Авторы [Newitt et al., 2002] оценили скорость современного дрейфа СМП более чем 40 км/год.

Анализируя эффект увеличения скорости дрейфа СМП, обнаруженного 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 другими 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. На карте (рис. 1) отмечены точки (звездочки) положений инструментальных положений СМП. Дан прогноз положения СМП-2004. Показана трасса лыжного перехода СССР-Канада 1988 года, прогноз положений виртуальных магнитных полюсов (ВМП) и измеренных на маршруте. Резкие разбросы значений ВМП в начале маршрута (в окрестности точки 1580 (2140)) связаны с измерениями, проведенными при очень низкой ( $-38^{\circ}\text{C}$ ) температуре, когда магнитометр замерзал.



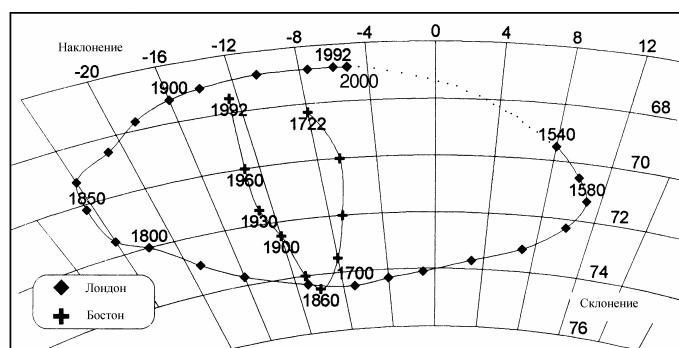
**Рис. 1.** Положения СМП: звездочки – измеренные, кружки – прогноз. Линия с квадратами – путь лыжной экспедиции СССР – Канада 1988 (квадраты – места измерений компонент геомагнитного поля). Линия с точками, соответственно, вычисленные положения ВМП. Штриховая линия – прогноз положения ВМП.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ДРЕЙФА СМП

На рис. 2 представлены сглаженные результаты наблюдений за изменениями наклона  $I$  и склонения  $D$ , опубликованные впервые L.A. Bauer [Bauer, 1895] для Лондона и Бостона, 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 положений с реальным дрейфом

СМП. Рисунок 2 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 и Бостоне (для Бостона данные наблюдений, так 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. Сравнение скоростей дрейфа ВСМП и СМП за последние 95 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 допустить, что СМП реально двигался так, как это следует рисунку 2, то определение местоположения СМП, сделанное Дж. Россом (1831 на рис. 1), оказывается ошибочным, и в действительности СМП в 1831 году находился восточнее примерно на 100 км. Рисунок 2 показывает, что с 1580 г. по 1860 г. СМП дрейфовал в направлении, обратном современному, - т.е. к югу. В пользу такого предположения говорит тот факт, что в данных Лондонской магнитной обсерватории нет подтверждения наличию резкого изменения скорости дрейфа СМП в промежутке времени между измерениями Росса и Амундсена (1904). В 1860 году какая-то причина вынудила СМП изменить направление своего дрейфа, развернуться и начать свой путь к северу. Рис. 2 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. 2.** Склонение и наклонение магнитного полюса, определенное на обсерватории Лондона и Бостона [Бауер, 1895].

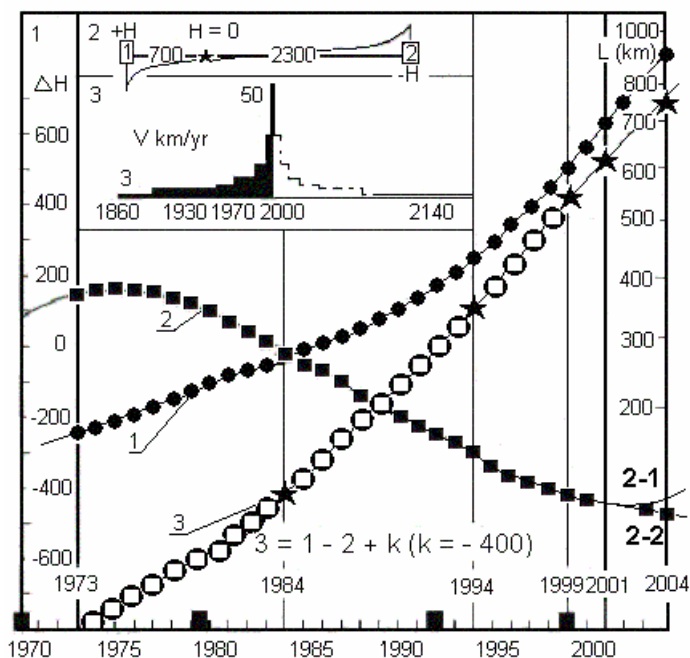
Анализируя рис. 2, видно, что в наше время (~ 2000 г) скорость дрейфа СМП должна быть максимальной, а в дальнейшем, – она должна уменьшаться, причем, таким образом, чтобы СМП в 2140 г. остановился, развернулся и стал дрейфовать в обратном направлении. Таким образом, в течение последних 450 лет наблюдается определенная логика в характере дрейфа ВСМП. Можно ли предложить модель, которая объяснит этот феномен?

## 2. МОДЕЛЬ ДРЕЙФА ПОЛЮСА

Обратим внимание на то, как происходил дрейф СМП в течение последних 100 лет. Рисунок 1 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. Рисунок 1 показывает, что направление дрейфа СМП совпадает с местоположением виртуальных магнитных полюсов (ВМП), определенных во время совместной Канадско-Российской лыжной экспедиции 1988 г [Weber et al., 1990]. Перед началом этой экспедиции нами был сделан предварительный прогноз положений ВМП [Кузнецов и др., 1997]. Наш прогноз базировался на всех известных измерениях компонент магнитного поля в Арктике. Вычисленные по прогнозу координаты ВМП практически совпали с координатами, измеренными на значительной части пути экспедиции [Кузнецов, 1996]. Попытаемся понять, почему СМП движется именно так.

Е.Р.Норе [1959] был первым, кто высказал идею, согласно которой дрейф СМП связан с глобальными магнитными аномалиями, наличие которых в Канаде и Сибири приводит к сжатию магнитных силовых линий в районе дрейфа СМП в своеобразный «жгут», вдоль которого и происходит дрейф полюса. Нашими исследованиями было подтверждено, что СМП действительно дрейфует вдоль этой трассы. Можно ли оценить, как полюс будет вести себя в ближайшем будущем, в течение 10 – 20 лет, и, более того, оценить, не началась ли смена полярности геомагнитного поля?



**Рис. 3.1.** Вариации Н компоненты: 1 – на станции Резольют Бей; 2 – на станции Мыс Челюскина. 3 – разность между величинами этих компонент ( $\Delta H$ ): звездочки – положения СМП (2004 – прогноз). Шкала справа: расстояние СМП ( $L$  км) от его местоположения в 1973. Черные квадраты – джерки [Mandea et al., 2000].

Рис. 3.2. Схема дрейфа СМП (звездочка) между двумя источниками поля 1 и 2.

Рис. 3.3. Скорость дрейфа СМП, начиная с 1860 г по наше время и прогноз понижения скорости дрейфа СМП при условии завершения цикла в 2140.

Обратимся к рисунку 3-2. Дадим определение, что представляет собой магнитный полюс. Магнитный полюс – это 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 (Н-компоненты) имеют противоположные направления, их величина меняется, - положение

точки, где эти величины уравновешивают друг друга ( $H = 0$ ), - меняется (см. рис. 3-2). 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. Контролируя величины  $H$ -компонент на этих обсерваториях при условии, что характер их изменения вполне логичен, можно предсказать местоположение СМП в будущем. Этот прием удачно использовался автором при прогнозе положения СМП в 1994 [Кузнецов, 1996]. На рис. 3-1 показаны переменные во времени (1973 – 2000 г.г.) составляющие  $H$ -компонент измеренные на этих обсерваториях  $H_1(t)$  и  $H_2(t)$ , а также их разность  $DH = H_1(t) - H_2(t)$ . На рис. 3-1 изображена зависимость  $DH(t)$ , которую можно представить как  $L(t)$ , где  $L$  – расстояние (в км, начиная от точки, где  $L = 0$ , для СМП-1973), которое проходил СМП вдоль трассы, изображенной на рис. 1 и отмеченной звездочками. СМП в 2004 году может попасть в точку 2004 на рис. 1, пройдя за три года примерно 150 км. Кривая  $DH(t)$  рассчитана для случая, когда величина  $H$ -компоненты на обсерватории мыс Челюскин начнет после 2000 г. - возрастать (сценарий 2-1). Если в будущем произойдет именно так, и если скорость  $H_2(t)$  начнет увеличиваться, то, в принципе, может оказаться возможной ситуация, когда скорости увеличения  $H$ -компонент на обеих обсерваториях окажутся равными и  $DH = 0$ . В такой ситуации полюс остановится и может начать двигаться в обратном направлении. Существует вероятность того, что это произойдет именно в точке 2140.

Возможен и другой вариант развития событий. Представим себе, что  $H_1(t)$  будет после 2000 г. продолжать увеличиваться, а  $H_2(t)$  – уменьшаться (сценарий 2-2). Это означает, что скорость дрейфа СМП будет продолжать возрастать. Скорее всего, в этой ситуации СМП «проскочит» точку 2140 и будет дальше двигаться с ускорением по направлению к обсерватории Мыс Челюскин. В принципе, возможно и дальнейшее движение СМП - по Восточному полушарию уже на юг, навстречу южному магнитному полюсу до тех пор, пока СМП не достигнет эпицентра Сибирской глобальной магнитной аномалии. Здесь он остановится до тех пор пока величина дипольного поля не окажется меньше поля аномалии. Как известно южный магнитный полюс (ЮМП) изменил направление своего дрейфа в 1860 г. и с небольшим замедлением, - дрейфует к северу, в направлении к магнитной аномалии. Согласно модели, он должен «остановиться» в эпицентре Антарктической аномалии и начать свой дрейф после того, как уменьшится величина дипольного поля.

Изменение расстояния  $L$  дрейфа СМП в течение времени  $t$ , начиная с 1860 г., и до последнего измерения в 2001, можно описать простой формулой:  $L = kt^2$ , где  $k$  меняется от 5 в начале 1900 г. до 6 к началу 2000, а время  $t = 0.1(T - 1860)$ , где  $T$  – текущий год. Формула позволяет прогнозировать положение СМП, предполагая, что и в дальнейшем он не будет менять направление дрейфа. В таком случае, например, СМП пересечет меридиан  $180^\circ$  и перейдет в восточное полушарие примерно в 2040 г., то может достичь положения ЮМП примерно в 2400 г.

### 3. УСКОРЕНИЕ ПОЛЮСА И ДЖЕРКИ

Джерк (jerk – толчок) явление в геомагнетизме, при котором происходят резкие (в течение года и меньше) изменения производной  $dB/dt$ , т.е. джерк, это резкое изменение скорости роста (убывания) интенсивности компонент индукции магнитного поля Земли

(В). Название джерк берет начало с работы [Courtillot, Besse, 1987], в которой авторы обратили внимание на поведение вековой вариации  $Y$ -компоненты геомагнитного поля в Европе в 1969-70 гг. Необычность поведения поля выражалась в следующем. Ряд среднегодовых значений  $dY/dt$ , начиная с 40-х годов и до конца 60-х, для каждой обсерватории, хорошо аппроксимировался параболой. Затем (с 1969 года) следовало 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. 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.

Может ли существовать взаимосвязь между джерками и дрейфом магнитных полюсов, как это было высказано впервые в [Newitt, et al., 2002]? Для того чтобы ответить на этот вопрос, представим скорость дрейфа магнитного полюса как:

$$V = dL/dt = (dH/dt) / (dH/dL), \quad (1)$$

где  $dH/dt$  суммарное изменение величины горизонтальной компоненты геомагнитного поля в районе магнитного полюса. Для 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 для  $V$  пространственных и временных градиентов поля  $H$ -компоненты [Паркинсон, 1986] показывает их совпадение с измеренными скоростями дрейфа магнитных полюсов. Как отмечалось, современные скорости дрейфа: СМП  $\approx 40$  км/год, ЮМП  $\approx 4$  км/год.

В [Mandea, et al., 2000] приведена зависимость  $dY/dt$  ( $dD/dt$ ), откуда следует, что по мере того, как амплитуда  $dY/dt$  с течением времени уменьшается, частота проявления джерков ( $w$ ) (величина, обратная интервалу времени между событиями, когда  $d^2Y/dt^2 = 0$ ) - возрастает, причём, таким образом, что произведение  $Y \cdot w$  ( $dY/dt \cdot w$ ) остается примерно постоянным. Подобный процесс можно описать уравнением колебаний с мягкой упругой силой (уравнением для осциллятора с затуханием) [Берже и др., 1991]:

$$m(d^2x/dt^2) + j(dx/dt) + f(x) = F \cos wt. \quad (2)$$

В уравнении (2): первый его член характеризует силу инерции, второй, - силу сопротивления (затухания), третий, - восстанавливающую (упругую) силу. После знака равенства, справа, в уравнении (2) - внешняя, возмущающая сила. Если она равна нулю ( $F \cos wt = 0$ ), то уравнение (2) характеризует затухающие колебания. Например, уравнение:

$$m(d^2x/dt^2) + j(dx/dt) + f(x) = 0 \quad (3)$$

описывает движение маятника при наличии сил сопротивления. Не вдаваясь в физику джерков и физику генерации геомагнитного поля, вместо (3) применим уравнение Ван дер Поля [Уиттекер, Ватсон, 1963]:

$$d^2Y/dt^2 - g[1 - Y^2/Y_o^2] dY/dt + w^2Y = 0, \quad (4)$$

здесь  $Y_o$  - исходная амплитуда,  $g$  - коэффициент затухания,  $w$  - частота,  $w^2Y$  - упругая сила. Уравнение (4) показывает поведение осциллятора с вынуждающей силой, в котором

колебания с малой амплитудой усиливаются, а колебания с большой амплитудой – затухают. Решение этого уравнения:

$$Y(t) = Y_0 \exp(-gt/2) \cos(\omega t + j),$$

при соответствующем подборе коэффициентов может с хорошей точностью описать зависимость  $dY/dt$  от времени, полученную из наблюдений. Учет упругой силы в (4) соответствует экспериментально наблюдаемой зависимости:  $\omega^2 \sim 1/Y$ .

В рассматриваемом случае фазовый портрет уравнения (4) соответствует сходящейся спирали:  $\gamma > 0$ . Механическим эквивалентом такой системы может быть модель, в которой шарик совершает колебательные движения в сферическом объеме, в нижней части которого имеется отверстие размером чуть больше диаметра шарика. Когда шарик приходит в равновесие и успокаивается ( $dY/dt = 0$ ), он проваливается в дырку (происходит бифуркация), и попадает в другой объем, аналогичный первому и т.д. Процесс повторяется при условии несовместимости отверстий этих объемов. Шарик, попадая в нижний объем, теряет часть своей потенциальной энергии.

Рассмотрим процесс возникновения джерков в контексте поведения геомагнитного поля в момент времени, предшествующий инверсии. Можно ли связать частоту образования джерков с бифуркацией, возникающей после установления в системе неустойчивого равновесия, с одной стороны. И, с другой, - попытаться выявить феноменологию экспериментально наблюдаемой связи увеличения скорости дрейфа СМП и увеличения частоты джерков  $\omega$ :  $V \sim dH/dt \sim \omega$ . Как следует из наших рассуждений,  $\omega^2 \sim 1/Y$ , однако, если скорость  $V$  однозначно (по модели) связана с  $dH/dt$ , то в геомагнетизме связь между  $dH/dt$  и  $dY/dt$  неоднозначна, следовательно, нет и прямой связи между  $V$  и  $\omega$ .

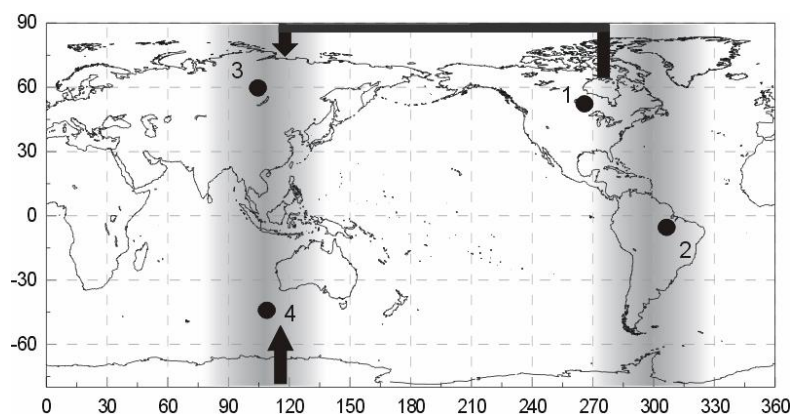
Зададимся вопросом, как долго может продолжаться ускорение СМП? Скорость дрейфа магнитного полюса:  $V = dL/dt$ , где  $L = kt^2$ , или  $V \sim t$ , т.е. скорость дрейфа СМП, согласно (1), будет и дальше возрастать со временем. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока градиент  $dH/dL$  будет оставаться малым, что характерно для полярной области. Как только градиент  $dH/dL$  возрастет, а именно так и должно произойти по мере приближения СМП к одной из магнитных аномалий, скорость СМП – уменьшится (т.к.  $V \sim dL/dH$ ). Магнитный полюс – остановится.

#### 4. РОЛЬ ГЛОБАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

Обратим внимание на весьма интересный и важный для нашей модели момент. Современные магнитные полюсы, как северный, так и южный, движутся не случайным образом, а дрейфуют вдоль трасс, характерных для дрейфа виртуальных магнитных полюсов в момент инверсии (см. рис. 4). Как было показано в [Kuznetsov, 1999], именно на этих трассах расположены глобальные магнитные аномалии (1 – 4 на рис. 4), оказывающие влияние на дрейф полюсов в момент инверсии. Предположим, что рост скорости  $V$  и частоты джерков  $\omega$  означает, что на Земле начнется (или уже началась) инверсия (или экскурс) магнитного поля, а не джерк, как это предлагается авторами [4]. Для того чтобы убедиться в правдоподобности такого предположения, рассмотрим, что представляют собой глобальные магнитные аномалии.

Глобальные магнитные аномалии (ГМА), согласно нашей модели, представляют собой долгоживущие гидродинамические вихри (вихри Россби [Кузнецов, 1995]), расположившиеся в тонком F-слое на границе внутреннего ядра. Наиболее близкий аналог глобальным магнитным аномалиям, как вихрям Россби, - это долгоживущие вихри (циклоны и антициклоны) в атмосферах Юпитера и Сатурна. Как известно, система вихрей Россби в атмосферах Юпитера и Сатурна наиболее устойчива тогда, когда она состоит из трех антициклонов и одного циклона [Незлин, Снежкин, 1990]. Аналогичная ситуация наблюдается с ГМА: в трех из них магнитное поле возрастает (это

антициклоны), а в одной (Бразильской) – поле уменьшается (это циклон). В момент инверсий, когда дипольная часть геомагнитного поля убывает, в магнитных аномалиях магнитное поле ещё некоторое время не меняется. Именно этот факт служит причиной того, что в момент инверсии трассы дрейфа полюсов «притягиваются» к ГМА.



**Рис. 4.** Прогноз положений магнитных полюсов СМП и ЮМП (стрелки). Полосы – направления дрейфов магнитных полюсов в моменты инверсий. Точки с номерами – глобальные магнитные аномалии.

Выясним причину, 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 токовых кольца не находящиеся на оси вращения Земли. В пользу такой модели говорит распределение джерков 1969 года по поверхности Земли [Madden, Le Mouel, 1982], где показано, что эпицентры максимальных величин джерков практически совпадают с эпицентрами глобальных аномалий.

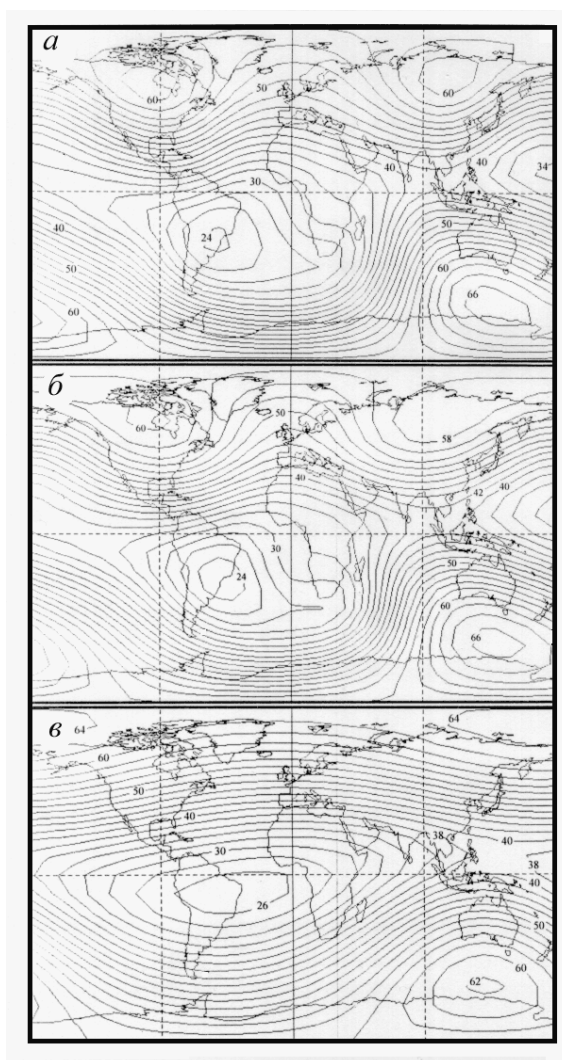
## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Автор комментария [Campbell, 2003] к работам [Newitt, et al., 2002; Barton, 2002] ставит под сомнение целесообразность самой идеи регистрации дрейфа магнитных полюсов. В качестве аргумента он приводит математическую модель описания геомагнитного поля в виде диполя, смещенного относительно центра Земли. По мнению автора, в такой ситуации вертикальность вектора поля и равенство нулю горизонтальной компоненты, ничего не означает, а является лишь следствием смещения оси генерации поля относительно оси вращения Земли. Barton и Newitt [Campbell, 2003] возражают против такого подхода, объясняя Кэмбеллу (Campbell) то, что реальная физическая модель геомагнитного поля не может быть подменена математической моделью. Предлагаемый Кэмбеллом пример математического описания поля далеко не единственный. Например, можно сослаться на цикл работ Alldridge [1987], в которых он описывает геомагнитное поле не путем разложения его в спектр, как Кэмбелл, а путем подбора неограниченного количества радиальных диполей. В этом случае, как и в первом, математическая модель ни в коей мере не объясняет природу реального геомагнитного поля. Как известно, в любой реальной модели генерации геомагнитного поля само магнитное поле является следствием протекания электрического тока (или перемещения проводящей жидкости с



вмороженным в неё магнитным полем) по проводящему токовому кольцу. В этом плане идеи Олдриджа значительно ближе, по сути, к физической модели геомагнитного поля, чем разложение поля в ряд Гаусса.

Олдридж путем оптимизации расположения токовых колец пришел к заключению, что их самое оптимальное положение соответствует границе внутреннего ядра. Этот вывод согласуется с идеей генерации геомагнитного поля на границе внутреннего ядра (в F-слое), следующее из модели горячей Земли [Кузнецов, 1990]. В этой модели дипольный источник представляет собой дифференциальное токовое кольцо, латеральные неоднородности которого точно соответствуют выявленной латеральной анизотропии внутреннего ядра. Заметим, что результаты исследования анизотропии внутреннего ядра опровергают возможность размещения реального источника поля в виде смещенного диполя. Данные по анизотропии показывают высокую степень симметричности ядра Земли [Кузнецов, 1997].



**Рис. 5.** Карта полного модуля поля (*а*). Карта полного модуля поля, синтезированная как сумма дипольного источника в виде дифференциального токового кольца и поля четырех источников в виде радиальных токовых колец (*б*). Поле дифференциального токового кольца (*в*).

Модель генерации геомагнитного поля, в которой, кроме осевого несимметричного диполя присутствуют четыре радиальных диполя, - иллюстрирует рис. 5. На рис. 5-а

изображена карта полного модуля поля. На рис. 5-б, - карта полного модуля поля, синтезированная как сумма дипольного источника в виде дифференциального токового кольца (рис. 5-в) и поля четырех источников в виде радиальных токовых колец, представляющих собой ГМА. Подбирая интенсивности этих источников поля, можно получить точное соответствие компьютерной модели карте реально наблюдаемого поля (см. рис 5-а и 5-б). Меняя интенсивности источников дипольного поля и источников поля аномалий, можно получить реально наблюдаемые направления и скорости дрейфа магнитных полюсов. Таким образом, дрейф магнитных полюсов (направление и скорость дрейфа) - является одной из важнейших характеристик геомагнетизма. Это тем более важно, что направления дрейфа и скорости палеомагнитных полюсов в периоды спокойного поля [Tarling, Abdeldayem, 1996] существенно различаются по сравнению с направлениями и скоростями современных магнитных полюсов.

Мы отмечали, что важную роль в движении полюсов в момент инверсии играют ГМА. Эти аномалии в гидродинамической модели являются вихрями Россби, они выполняют роль переносчика тепла в F-слое между внутренним и внешним ядром, где, согласно модели генерации поля, происходят фазовые переходы первого рода. Температура фазового перехода при заданном давлении величина постоянная, а термодинамическая система стремится поддержать её на заданном уровне. Если принять эту идею, то оказывается, что явления, - получившие в геомагнетизме название джерки, представляют собой маркированные магнитным полем вариации температуры при релаксации системы к температуре фазового перехода. Увеличение частоты джерков и уменьшение их амплитуды означает выход системы на неустойчивую асимптоту, при которой происходит смена режима – бифуркация. В такой модели ускорение полюсов и увеличение частоты джерков может характеризовать, в том числе, и начало инверсии. Однако имеющиеся в нашем распоряжении данные по джеркам и дрейфу магнитных полюсов не дают оснований для того, чтобы определенно ответить, началась ли в настоящее время инверсия или нет.

Благодарность.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Президиума РАН №13.13.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок и хаос. О детерминистском подходе к турбулентности. М. Мир. 1991. 367 с.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и солнечной системы. Новосибирск. ИГГ. 1990. 217 с.
- Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка положения виртуальных магнитных полюсов (По результатам советско-канадских измерений в Центральной Арктике) // Геология и геофизика. Т. 31. № 2. С. 115-116. 1990.
- Кузнецов В.В. Фокусы векового хода как гидродинамические вихри Россби // ДАН. Т.340. №. 5. С. 685-687. 1995.
- Кузнецов В.В. Положение северного магнитного полюса в 1994 г // ДАН. Т. 348, N.3. С. 397-399. 1996.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра // УФН. Т. 167. № 9. С. 1001-1012. 1997.
- Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. М. Наука. 1990. 238с.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М. Мир. 1986. 525 с.
- Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж. Н. Курс современного анализа. Ч II. М.: Г.И. ФМ.Л. 1963.
  
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouel J.-L., Saracco G. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks // J. Geophys. Res. V. 101. P. 21975-21994. 1996.
- Alldrige L.R. Current loops fitted to geomagnetic model spherical harmonic coefficients // J. Geomag. Geoelectr. V. 39. P. 271-296. 1987.
- Barton C.E. Survey tracks current position of South Magnetic Pole // EOS. Trans. AGU. V. 83/ P. 291. 2002.
- Bauer L.A. Beitrage zur Kenntnis des Wesens der Sakular-variation des Erdmagnetismus. Dissert. Univ. Berlin. 1895.
- Campbell W.H. Comment on "Survey tracks current position of South Magnetic Pole" and "Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk" // EOS. Trans. AGU. V. 84 P. 42. 2003.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversal, polar wander, and core-mantle coupling // Science V. 237. P. 1140-1147. 1987.
- Gavoret J., Gibert D., Menvielle M., Le Mouel J.-L. Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field // J. Geophys. Res. V. 91. P. 4787-4796. 1986.
- Hope E.R. Geotectonics of the Arctic Ocean and the Great Arctic Magnetic Anomaly // J. Geophys. Res. V. 64. P. 407-427. 1959.
- Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals // Phys. Earth Plan. Inter. V. 115. P. 173-179. 1999.
- Madden T., Le Mouel J.-L. The recent secular variation and the motion at the core surface // Phil. Trans. R. Soc. Lond. V. A 306. P. 271-280. 1982.
- Mandeau M., Bellander E., Le Mouel J.-L. A geomagnetic jerk for the end of the 20<sup>th</sup> century? // Earth Planet. Sci. Lett. V. 183. P. 369-373. 2000.
- Newitt L.R., Niblett E.R. Relocation of the north magnetic dip pole // Can. J. Earth Sci. V. 23. P. 1062-1067. 1986.
- Newitt L.R., Barton C.E. The position of the North Magnetic dip pole in 1994 // J. Geomag. Geoelectr. V. 48. P. 221-232. 1996.
- Newitt L.R., Mandeau M., McKee L.A., Orgeval J.J. Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk // EOS, Transactions AGU V. 83. P. 385. 2002.
- Serson P.H. Tracking the north magnetic pole // New Scientist. June. 1981.
- Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a "small-circle" assessment of the Gondwanan polar-wander path. Geophys. J. Int. V. 125. P. 115-122. 1996.
- Weber R., Dexter L., Holloway Ch., Buxton M. Polar bridge an arctic odyssey. Key Porter Books Limited. Canada. Ontario. 1990.