

УДК 550.384

ДВИЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ В ПОСЛЕДНЕМ ДЕСЯТИЛЕТИИ

© 2012 г. Т. И. Зверева

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: zvereva@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.07.2011 г.

После доработки 05.09.2011 г.

По векторным магнитным данным немецкого спутника CHAMP построены среднесуточные сферические гармонические модели главного геомагнитного поля до $n = m = 10$ для временного периода с мая 2001 г. по конец 2009 г. с интервалом 4 дня. По ним получены средние за полгода (16 моделей), по которым рассчитаны координаты северного и южного магнитных полюсов (точек, в которых силовые линии магнитного поля вертикальны). Прослежены их изменения за эти восемь с половиной лет. Оба полюса продолжают двигаться в северном и западном направлении. Северный магнитный полюс за это время переместился на 400 км. Причем скорость его движения до 2003 г. росла, достигнув 62.5 км/год, после чего начала падать и к концу 2009 г. снизилась до 45 км/год. Кроме того, направление движения из северо-северо-западного перешло в северо-западное, т. е. полюс стал немного разворачиваться в сторону Канады. Южный магнитный полюс двигался в 10 раз медленнее и за этот период переместился на 42 км. Рассчитаны также координаты геомагнитных (дипольных) полюсов и параметры эксцентричного диполя. Прослежена их динамика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитные полюса Земли, а именно точки на поверхности нашей планеты в северном и южном полушариях, где магнитное поле направлено вертикально, в последние годы привлекают к себе внимание не только ученых. Связано это с несколько необычным поведением северного магнитного полюса (СМП). Условимся называть полюс, расположенный в северном полушарии, северным магнитным полюсом. Известно, что магнитные полюса находятся в постоянном движении. К примеру, начиная с 1900 г. по 2010 г., СМП переместился на ~1800 км, покинув в 90-х гг. территорию Канады, и до сих пор движется в канадских арктических водах. Но если в период с 1900 г. СМП двигался со скоростью, не превышающей 9 км/год, то, начиная с 70-х гг. прошлого столетия, он начал двигаться с нарастающим ускорением и на рубеже тысячелетий его скорость достигла значения ~50 км/год. Это дало основание канадским геофизикам, координирующим в Канадской геологической службе работы по измерениям координат положения СМП, заявить, что при таком темпе и направлении движения полюса он примерно через 50 лет может достичь Сибири, миная при этом Северный географический полюс, обогнув его с запада [сайт Канадской геологической службы: <http://cgc.mcgill.ca/geomag/nmp/northpolee.php>]. Им вторят другие видные ученые, например, Olsen and Mandaia [2007a].

Последствия этого сложно оценить в полной мере, но научную общественность этот факт тре-

вожит. Тревога вызвана многими причинами. Одно из наиболее очевидных опасений связано с тем, что многие живые организмы на Земле связаны тем или иным образом с геомагнитным полем, так как последнее служит, по меньшей мере, основой пространственной ориентации огромного числа видов, живущих на нашей планете. Самым ярким примером этого является ориентация птиц при их перелетах.

Кроме того, учитывая, что в течение уже очень длительного времени магнитный момент Земли уменьшается, ослабевает и защитная функция магнитного поля от радиационного воздействия космоса. Ну и наконец, приходит в голову мысль о возможной перспективе инверсии магнитного поля или его экскурсе. Такое кажущееся маловероятным в обозримом будущем событие имеет, тем не менее, под собой некоторые основания. Одним из них является то, что настоящий период прямой полярности поля продолжается ~780 тыс. лет. Притом, что интервал между инверсиями варьируется от десятков тысяч до миллионов лет без какой-либо закономерности.

В работе [Ляхов и др., 2006] приводятся возможные контуры связи между геосферами Земли, которые помогают оценить возможные последствия обсуждаемой здесь проблемы. Вследствие изменения магнитного поля происходит перестройка структуры и динамики верхней атмосферы и ионосферы Земли, изменяется глобальная картина распределения электрических полей

и условия протекания тока в глобальной токовой цепи. Это изменяет энергетический баланс в атмосфере и меняет климатические параметры. Одновременно изменение конвекции в жидком ядре ведет к изменению термоупругого состояния земной коры и условий дегазации, при этом происходит рост содержания метана в атмосфере, развивается парниковый эффект и т.д.

И, наконец, чисто практический пример. В связи со значительным смещением северного магнитного полюса в январе 2011 г. международному аэропорту Тампе (США, штат Флорида) пришлось закрыть главную взлетно-посадочную полосу на 10 дней для перерисовки указателей магнитного курса на покрытии полосы и нанесения новой разметки рулежных дорожек.

Поэтому понятен интерес к любой новой информации, касающейся этого вопроса. В первой части статьи и вкраплениями в тексте во второй части будет дан краткий обзор того, что известно по этому вопросу. Во второй части будут приведены собственные результаты.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР

2.1. Определения магнитных полюсов

Прежде чем рассказать о состоянии дел в этой проблеме, необходимо уточнить некоторые определения, чтобы избежать в дальнейшем разночтения.

Существует несколько определений магнитных полюсов Земли. Начнем с измеренных полюсов, т.е. тех точек на поверхности нашей планеты в северном и южном полушариях, где магнитное поле направлено вертикально. Относительно измеренных полюсов необходимо отметить следующее.

Во-первых, таких точек при нахождении какого-либо магнитного полюса может оказаться несколько, и ареал таких полюсов-двойников может достигать нескольких километров. Связано это с влиянием небольших локальных аномалий, порожденных намагниченностью пород земной коры и осадочного чехла.

Во-вторых, каждая такая точка испытывает суточный ход, описывая эллипс, вытянутый в направлении с юго-востока на северо-запад (см. рис. 1) [сайт Канадской геологической службы http://cgs.mcan.gc.ca/geomag/nmp/daily_mvt_rarip_e.php]. Причиной таких перемещений является, конечно же, Солнце. И если в спокойные дни размеры суточных эллипсов небольшие, то в возмущенные — большая ось для СМП может достигать 85 км. Южный магнитный полюс (ЮМП) ведет себя более сдержанно, и даже в самые возмущенные дни не уходит далее ~30 км.

И последнее. Начиная с конца прошлого века, СМП покинул территорию Канады, ЮМП покинул сушу еще раньше. Таким образом, задача на-

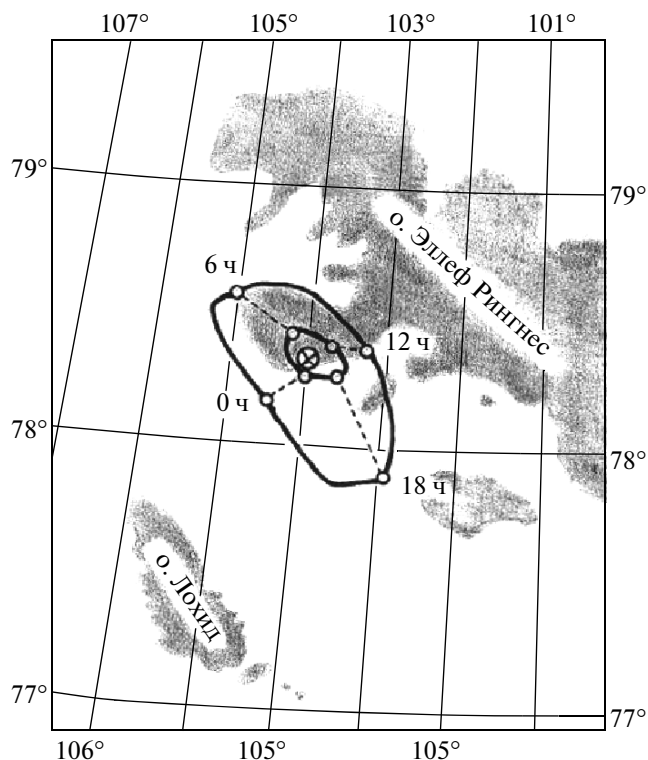


Рис. 1. Суточный ход, проходимый Северным магнитным полюсом в спокойный день (внутренний овал) и в магнито-активный день (внешний овал) по результатам экспедиции 1994 года. В 1994 году северный магнитный полюс находился на территории канадского острова Эллеф-Рингнес — последнего острова на пути в арктические воды.

хождения магнитных полюсов стала чрезвычайно сложной. Ведь измерения эти можно проводить весной в течение месяца или даже менее, так как надо успеть до тепла, чтобы льдины были еще крепкими, но было уже не так холодно. Последние измерения СМП были проведены в 2001 и в 2007 г. Авторы измерений в 2007 г. [Newitt et al., 2009] дают оценку точности определения полюса — 40 км. Обычно эта ошибка меньше — просто во время экспедиции 2007 г. не удалось провести достаточного количества измерений. Но в любом случае эта ошибка может достигать десятка километров.

Второе определение полюса — модельный магнитный полюс.

В 1838 г. Гаусс предложил аналитическое представление магнитного поля Земли, которое широко используется до сих пор. Разработанный им метод сферического гармонического анализа основан на предположении потенциальности магнитного поля Земли. Тогда его потенциал может быть представлен в виде [Яновский, 1978]:

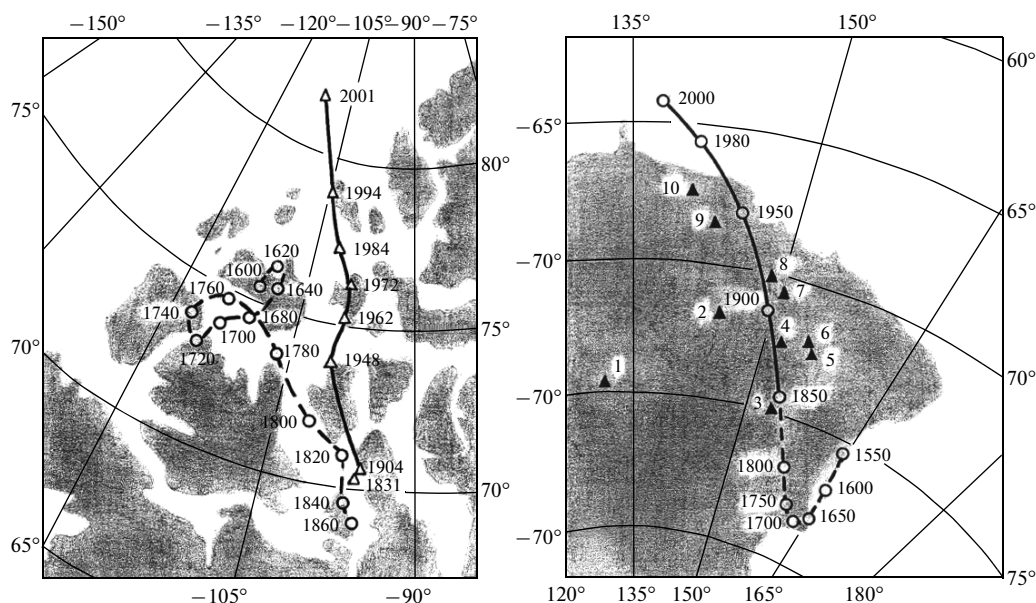


Рис. 2. Перемещение Северного магнитного полюса с 1600 по 2001 гг. (слева). Сплошная линия – движение измеренного магнитного полюса (с 1831 по 2001 гг.), штриховая – реконструкция дрейфа магнитного полюса с 1660 по 1860 гг. Реконструкция дрейфа южного магнитного полюса за 450 лет (справа). Треугольниками обозначены места, в которых положение магнитного полюса определялось измерениями.

$$U(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times \quad (1)$$

$$\times (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta),$$

$$X = -\frac{1}{r} \frac{dU}{d\theta}, \quad Y = -\frac{1}{r \sin\theta} \frac{dU}{d\lambda}, \quad Z = -\frac{dU}{dr}, \quad (2)$$

где U – геомагнитный потенциал в точке с географическими координатами r , θ , λ (радиус, коширота = 90° – широта и долгота); X , Y и Z представляют собой северную, восточную и вертикальную, направленную вниз, компоненты поля; a – средний радиус Земли; $P_n^m(\cos\theta)$ – присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m в нормировке Шмидта; g_n^m и h_n^m – постоянные коэффициенты.

По имеющимся измерениям поля вычисляют коэффициенты g_n^m , h_n^m , а по ним уже можно рассчитать поле в любой точке, в частности, найти координаты полюсов.

Современные модели главного магнитного поля Земли, а именно, эталонная международная модель IGRF, содержит 195 коэффициентов разложения, что соответствует $n = m = 13$ в представленных формулах. Полюса, рассчитанные по всему набору коэффициентов, будем называть модельными полюсами.

Можно рассчитать полюс по первым трем коэффициентам разложения ($n = m = 1$), что будет

соответствовать полюсу диполя. Этот полюс будем называть дипольным или геомагнитным, как его тоже часто называют. Он широко используется в задачах, связанных с исследованиями внешнего поля Земли. Если рассчитать полюса по восьми коэффициентам ($n = m = 2$), то получим полюса эксцентричного диполя.

2.2. Измеренные полюса

Итак, введены четыре определения магнитных полюсов. Вернемся к измеренным полюсам. В 1831 г. шотландский исследователь Джеймс Кларк Росс впервые определил местоположение СМП на полуострове Бутия, ныне являющимся частью Северной Канады, и водрузил на этом месте флаг Великобритании. Несколько позже в 1840 г. впервые была осуществлена попытка измерить координаты Южного магнитного полюса. С тех пор СМП был измерен 8 раз, а ЮМП – 12. На левой половине рис. 2 представлено перемещение Северного магнитного полюса с 1600 по 2001 гг. Сплошной линией изображено движение измеренного магнитного полюса (с 1831 по 2001 гг.) и штриховой – реконструкция дрейфа магнитного полюса с 1660 по 1860 гг. по моделям [сайт Канадской геологической службы]. На правой половине рис. 2 дана реконструкция по моделям дрейфа Южного магнитного полюса за 450 лет. Треугольниками обозначены места, в которых положение магнитного полюса определялось измерениями [Дьяченко, 2003]. Видно, что у СМП периоды блуждания и замедления сменялись периодами по-

чти прямолинейного движения (с 1760 по 1820 гг. и с 1904 по 2001 гг.). ЮМП приблизительно до 1700 г. двигался по направлению к Южному географическому полюсу, затем развернулся и начал движение в сторону юго-восточной оконечности Индийского океана.

2.3. Движение модельных магнитных полюсов

Как уже говорилось выше, в настоящее время измерения с целью определить положение магнитных полюсов – очень сложная задача. Поэтому в последние годы информация о передвижении полюсов основывалась в основном на модельных полюсах. На рисунке 3 приводятся карты из работы [Finlay et al., 2010], на которых прослеживается движение модельных и геомагнитных полюсов, начиная с 1900 по 2015 гг. Они были построены по международным моделям главного геомагнитного поля IGRF, которые принимаются каждые 5 лет по результатам работы нескольких международных коллективов (от России в этой работе принимает участие лаборатория главного геомагнитного поля ИЗМИРАН). Последняя модель IGRF-2010 была принята в конце 2009 г. [Finlay et al., 2010]. Она содержит не только модель главного поля на начало 2010 г. (до $n = m = 13$), но и скорость изменения этого поля на следующие 5 лет (до $n = m = 8$), имея в виду, что характер изменения скорости принимается линейным.

Следует отметить, что модельные полюса с неплохой точностью приближают измеренные. Например, расхождение между измеренным в декабре 2000 г. ЮМП и его модельным значением, построенным по модели IGRF-2000, составило 11 км. Однако модельный и измеренный СМП в 2001 г. отстоят друг от друга на 43 км. Эта разница отчасти происходит от влияния местных магнитных аномалий. Видно, что модельные полюса с неплохой точностью приближают полюса измеренные. Они не требуют специальных экспедиций и вычисляются по измерениям на магнитных обсерваториях и, главное, по данным специальных спутников. Уже больше года нет таких спутников. Поэтому дальнейшее продвижение в проблеме определения магнитных полюсов произойдет после запуска серии из трех спутников SWARM [Friis-Christensen, 2006], который планировался на 2011 г., но по последней информации перенесен на середину 2012 г.

3. Методика расчета и данные

Модельные магнитные полюса в данной работе получаются из моделей, полученных по формулам (1), где $n = m = 10$. Дипольные или геомагнитные полюса рассчитываются по трем главным коэффициентам разложения из (1) по

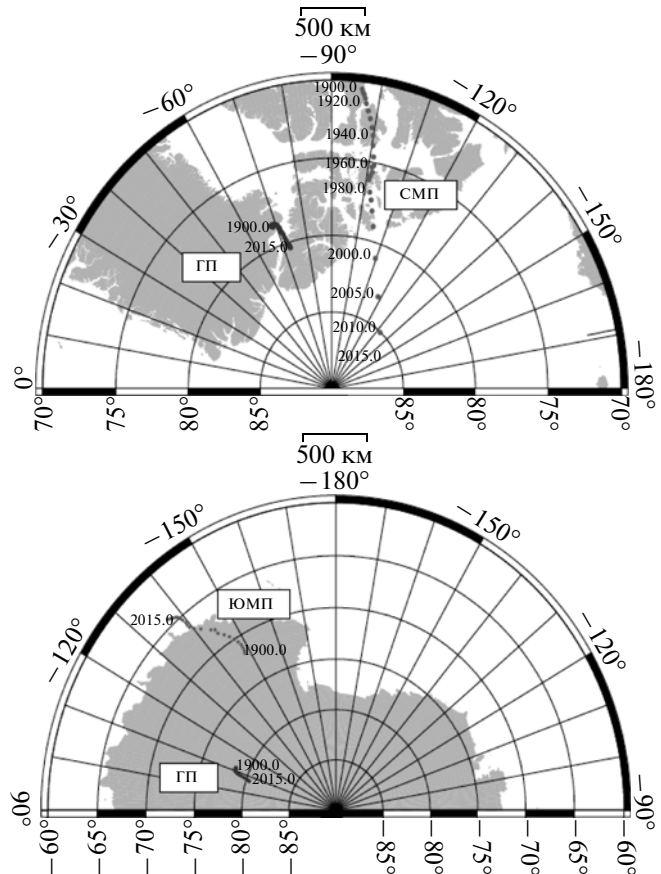


Рис. 3. Движение северного и южного модельных полюсов (СМП и ЮМП) и геомагнитных полюсов (ГП) с 1900 по 2015 гг. Построено по последней генерации международного эталонного магнитного поля IGRF-11, принятой в 2010 г. Сверху – северное полушарие, снизу – южное.

формулам [Яновский, 1978]: широта $\varphi = \arctg \frac{g_1^0}{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}$ и долгота $\lambda = \arctg \frac{h_1^1}{g_1^1}$.

Эксцентричный диполь рассчитывался по формулам из книги [Бенькова и др., 1964].

В качестве данных были использованы векторные измерения магнитного поля на немецком спутнике CHAMP с мая 2001 по конец 2009 гг. (далее 2001.5–2009). И хотя CHAMP летал до сентября 2010 г., но последний 2010 г. был исключен из рассмотрения из-за того, что качество данных ухудшилось, а именно, количество данных в различные дни стали сильно различаться. Нарушалась пространственная однородность покрытия данными за сутки. А это, как известно, влияет на точность суточных сферических гармонических моделей. Нам нужен был однородный ряд данных – этим была определена верхняя граница временного интервала исследования.

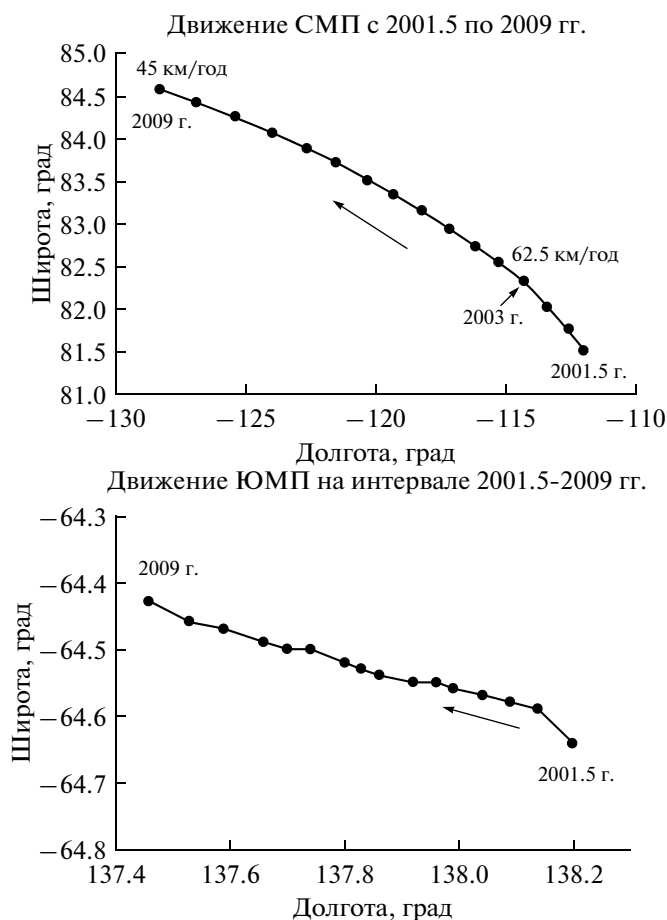


Рис. 4. Перемещения СМП (сверху) и ЮМП (снизу) за период времени с 2001.5 по 2009 гг.

Были построены среднесуточные сферические гармонические модели главного геомагнитного поля для обозначенного выше периода с интервалом в четыре дня. Внутри одного дня брались все имеющиеся измерения с секундным разрешением (всего ~ около 86000 точек). Итого было получены модели до $n = m = 10$ (число сферических коэффициентов = 120) и изменения каждого коэффициента по времени для указанного интервала. Понятно, что для выявления тенденции изменения движения полюсов такая дискретность построенных моделей не нужна, и можно было бы строить модели не с такой дискретностью по времени. Но зато, проведя полугодовое осреднение и получив всего 16 точек, мы частично избавились от погрешностей моделей, связанных с неучетом в моделях вклада внешних полей.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Движение модельных полюсов

Все прогнозы движения СМП, о которых говорилось выше, базируются, в основном, на различ-

ных сферических гармонических моделях главного геомагнитного поля, чаще всего на моделях IGRF, которые обновляются, как уже говорилось, каждые пять лет. Поэтому прогнозные оценки являются достаточно грубыми. И в период, когда СМП все время меняет характер своего движения, проследить, что происходит внутри пятилетнего интервала, не представляется возможным. В представленной ниже работе модели главного поля построены с интервалом в полгода, что дает возможность не только оценить скорости движения полюсов и других характеристик магнитного поля, но и изменение направления их движения.

На рисунке 4 представлены кривые движения СМП и ЮМП полюсов с 2001.5 по 2009 гг. Первое, что бросается в глаза — это полная асимметрия движения обоих полюсов, что подтверждает результаты других исследователей, например, [Mandea and Dormy; 2003]. СМП передвинулся за этот период на ~400 км., в то время как южный — всего на 42.4 км. Скорость СМП в этом временном интервале изменялась в пределах 45–62.5 км/год, а скорость ЮМП не превышала значения 8.5 км/год за весь рассматриваемый период. ЮМП продолжает, как и ранее, движение на запад и в направлении экватора. СМП поменял направление движения с северо-северо-западного на северо-западное.

Далее речь пойдет о СМП. За период времени с 1900 по 2010 гг. СМП передвинулся на ~1757 км. С 1900 по 1970 гг. он сместился на ~622 км, а с 1970 по 2010 гг. — на ~1135 км. Начав ускоряться в 70-х годах прошлого столетия, он двигался с ускорением до ~2003 г., достигнув значения примерно 62.5 км/год (рис. 4, сверху). Затем движение полюса начало замедляться и в 2009 г. уменьшилось до значения примерно 45 км/год. При этом следует отметить, что полюс стал немного разворачиваться в западном направлении. Так скорость движения полюса в исследуемом временном интервале (2001.5–2009 гг.) по широте уменьшилась с 58 до 35 км/год, в то время как скорость движения по долготе увеличилась с 23 до 32 км/год. Это дает основания надеяться, что северный полюс всего-навсего “блуждает”, не покинет района Канадской аномалии и не достигнет примерно через 50 лет Сибири, как это прогнозировалось ранее. Напомним, что по историческим данным (см. рис. 2) “блуждания” полюса имели место и ранее.

Далее будет уместным сказать о погрешностях вычисления координат полюсов по рассматриваемым здесь (модели ИЗМИРАН) моделям. В таблице приведены результаты сравнения определения координат СМП, вычисленных по моделям ИЗМИРАН, по моделям IGRF [Finlay et al., 2010] и полученных непосредственно измерениями, проведенными Geological Survey of Canada (GSC), Bureau de Recherches Geologiques et Minières,

Сравнение координат СМП, вычисленных по моделям ИЗМИРАН, по модели IGRF-2005 и полученных непосредственно измерениями

Год	Источник результата	Широта, N, град	Долгота, W, град	Расстояние между двумя полюсами, км
2005	По модели ИЗМИРАН	83.15°	118.24°	4
	IGRF-2005	83.19°	118.24°	
2001	По модели ИЗМИРАН	81.26°	111.21°	11
	Измерения GSC и др.	81.30°	110.80°	
2007	По модели ИЗМИРАН	83.88°	122.01°	17
	Измерения GSC и др.	83.95°	120.72°	

France, Institut de Physique du Globe de Paris [Newitt et al, 2009]. Последние измерения СМП были осуществлены в 2001 и 2007 годах. Координаты СМП, полученные по модели ИЗМИРАН и модели IGRF для 2005 года, очень близки. Отличия координат СМП, полученных по моделям ИЗМИРАН, от измеренных на месте, несколько выше.

Несколько слов о погрешности построенных моделей главного геомагнитного поля ИЗМИРАН, по которым рассчитывались координаты полюсов. Модели строились только по данным спутника CHAMP, однородно распределенным в пространстве, что очень важно для получения модели с максимальной точностью. По времени данные также однородны. Кроме того, данных много, за счет чего усредняется вклад в поле процессов, носящих случайный характер. Теперь об ошибках моделей, связанных с тем, что в формулах (1)–(2) не рассматриваются члены, отражающие вклад вариаций внешней природы. Во-первых, проделанные нами ранее тесты [Головков и др., 2007] показывают, что невязка в методе наименьших квадратов, с помощью которого получают наборы сферических коэффициентов моделей геомагнитного поля, коррелирует с *Dst*-вариацией. Это означает, что часть внешних возмущений “уходит” в невязку. Кроме того, тестовые расчеты показали, что если строить модели с учетом членов внешнего поля до $n = m = 1$, то невязка таких моделей уменьшается, но сами коэффициенты разложения главного поля почти не меняются. Это в большой степени связано с тем, что данных много и они однородны и хорошего качества.

Во-вторых, часть внешнего поля, генерируемая токами ионосферы, поначалу присутствует в кривых временного изменения сферических коэффициентов (в суточных моделях главного поля через каждые 4 дня) в виде отчетливо заметной высокочастотной “бороды” на фоне некоторого гладкого тренда, которая отражает вклад ионосферы и коррелирует со степенью возмущенности магнитного поля. Это утверждение подтверждается также характером этих кривых в послед-

ние несколько очень магнито-спокойных лет (до 2009 г.), где “бороды” практически нет. Так как мы в своих расчетах используем сглаженные кривые сферических коэффициентов, то таким образом считаем, что ионосферные источники убраны из наших моделей. Что, кстати, видно из таблицы (1–2 строки) – хорошее совпадение с моделью IGRF-2005, а модели IGRF получаются из моделей-кандидатов, которые тем или иным способом убирают внешние поля, в основном предварительной селекцией данных.

4.2 Движение геомагнитных полюсов

С 1900 по 2010 гг. дипольные полюса переместились на ~170 км (см. рис. 3). При этом северный дипольный полюс двигался вначале на юго-восток со скоростью, не превышающей 1 км/год, затем в 40-х годах развернулся и начал движение в северо-западном направлении, все время ускоряясь. Угол наклона диполя с осью вращения Земли незначительно увеличивался от значения 11.32° в 1900 г. до максимального значения 11.45° в 1950 г., затем начал равномерно уменьшаться до минимального значения 9.92° в 2010 г. (Понятно, что

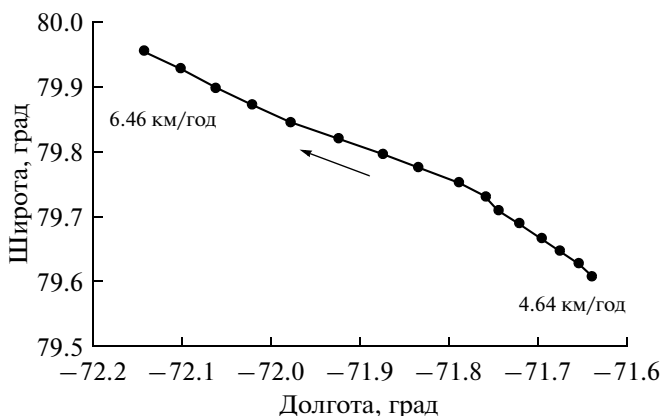


Рис. 5. Движение северного дипольного полюса в период с 2001.5 по 2009 гг.

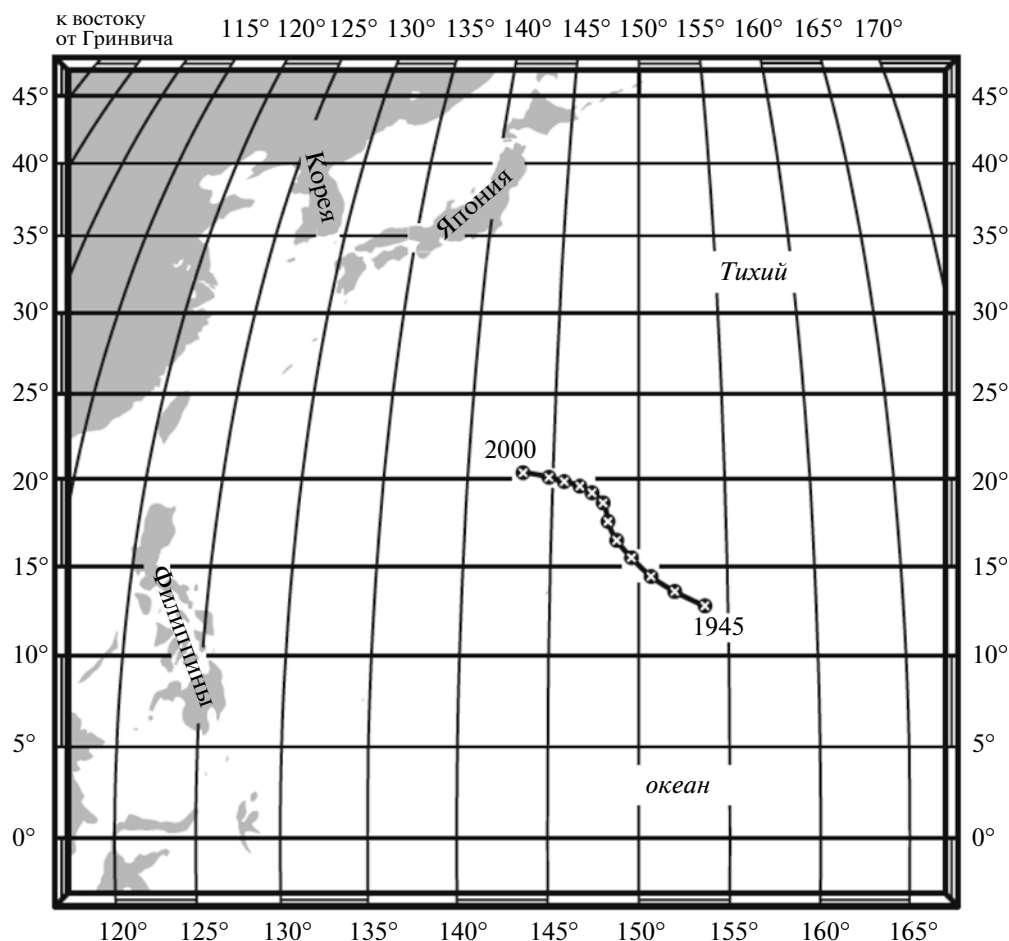


Рис. 6. Проекция центра эксцентричного диполя из центра Земли на ее поверхность за период 1945–2000 гг., построенная по моделям IGRF.

южный геомагнитный полюс двигался центрально-симметрично северному).

В период с 2001.5 по 2009 гг. северный дипольный полюс продолжал двигаться в северо-западном направлении со скоростями 4.6 км/год в начале интервала и 6.5 км/год в конце (см. рис. 5).

4.3. Движение эксцентричного диполя

Эксцентричный диполь рассчитывается, как известно, по восьми коэффициентам разложения (1), что соответствует $n = m = 2$. Магнитный момент и направление в пространстве эксцентричного и центрального диполя совпадают. А центр эксцентричного диполя смещен в сторону Тихого океана, и в последние годы находится под Марианскими островами. Проекция центра эксцентричного диполя из центра Земли на ее поверхность за период 1945–2000 гг., построенная по моделям IGRF, представлена на рис. 6 [Дьяченко, 2003].

За период времени с мая 2001 по декабрь 2009 года центр эксцентричного диполя сместился на 2.2 км на запад и на 530 метров на север (см. рис. 7 сверху). Расстояние магнитного центра эксцентричного диполя от центра Земли увеличилось с 535 до 553 километров (рис. 7 снизу). В радиальном направлении диполь двигался со средней скоростью 2 км/год.

4.4. Движение Бразильской аномалии

Важными характеристиками главного геомагнитного поля являются западный дрейф и мировые магнитные аномалии. Посмотрим, как вела себя Бразильская аномалия в последнем столетии и десятилетии.

На рисунке 8 из работы [Finlay et al., 2010] представлен характер движения Южной Атлантической или Бразильской аномалии во время XX столетия. Верхняя кривая показывает, как минимум модуля магнитного поля уменьшался с 1900 г. до наших дней. На нижней кривой показаны точ-

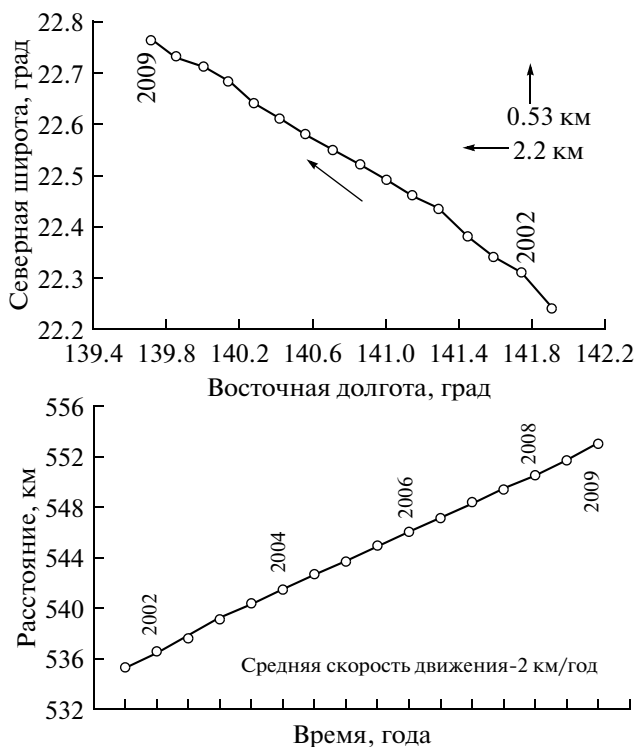


Рис. 7. Перемещение центра эксцентричного диполя (сверху) за период времени с 2001.5 по 2009 гг. Изменение расстояние магнитного центра эксцентричного диполя от центра Земли за этот же период (снизу).

ки локализации минимума модуля поля в зависимости от времени.

В период с 2001.5 по 2009 гг. минимум модуля магнитного поля уменьшился еще на 230 нТл. Точка локализации минимума сдвинулась на запад еще на 1.5 градуса, двигаясь практически равномерно со скоростью 0.2 градуса в год.

5. Обсуждение результатов

Еще в 1959 г. канадский магнитолог Норе [Норе, 1959] предположил, что СМП движется под влиянием глобальных аномалий – Сибирской и Канадской.

Кузнецов в своих работах [Кузнецов, 1996; 1998] разрабатывает модель дрейфа магнитных полюсов, которая опирается на постулат, согласно которому магнитное поле Земли аддитивно складывается из дипольной, основной части, и поля глобальных магнитных аномалий (ГМА). Источники поля ГМА на сравнительно небольших временных интервалах, порядка тысячи лет, квазинезависимы от основного поля. По его модели ГМА представляют собой гидродинамические вихри, возникающие на границе внутреннего ядра Земли с изначально замороженным в них основным магнитным полем.

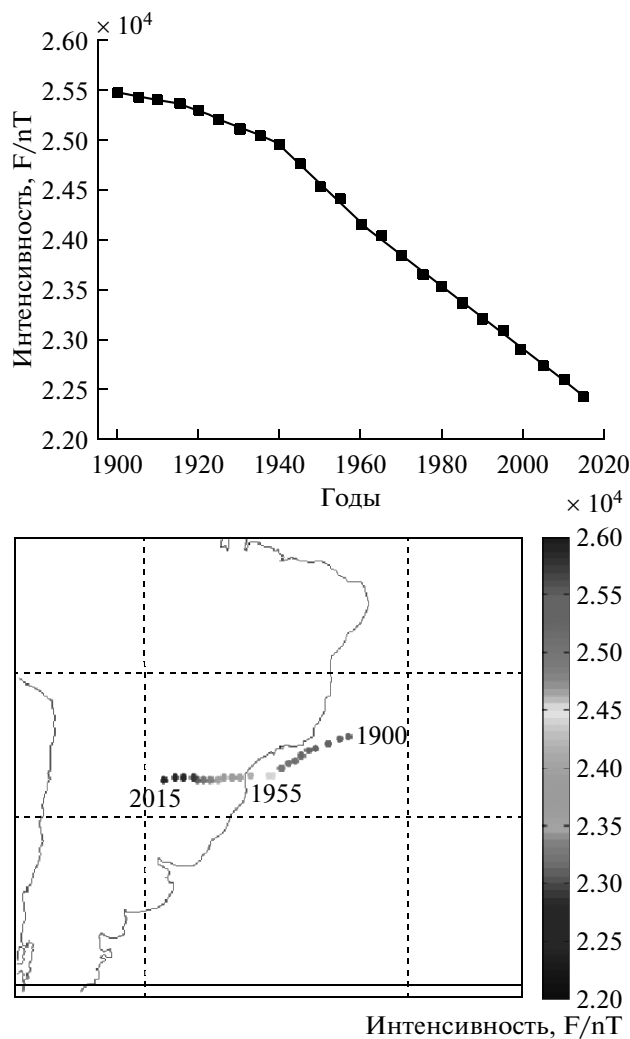


Рис. 8. Движение Южной Атлантической аномалии во время XX столетия. Верхняя кривая показывает, как минимум модуля магнитного уменьшается с 1900 г. до наших дней. На нижней кривой показаны точки локализации минимума модуля поля в зависимости от времени.

В прошлом десятилетии появились работы, например, [Newitt at al., 2002; Olsen and Mandea, 2007b], в которых было выдвинуто предположение о том, что неординарное поведение СМП полюса в 70-х годах было вызвано джерком 1969–1970 г. Результаты данной работы подтверждают гипотезу существования связи между наличием джерка и движением магнитного полюса. Согласно ряду работ, например [Olsen and Mandea, 2007b], последний джерк имел место в районе 2003 г. Действительно, как видно на кривой движения СМП (рис. 4 сверху), примерно в 2003 г. наблюдается изменение тенденции движения полюса – плавно поменялся тангенс наклона кривой между двумя более-менее прямолинейными участками – картинка, характерная для момента

джерка. Эта тенденция прослеживается и в кривой передвижения центра эксцентричного диполя (рис. 7 сверху).

Дальнейшее понимание процессов, происходящих внутри ядра, на причину ускорения СМП дает недавнее трехмерное численное моделирование геодинamo [Aubert et al., 2008], а также работа [Chulliat et al., 2010]. В последней говорится о том, что плюмы, представляющие собой жидкость меньшей плотности, формируются на границе внутреннего ядра и впоследствии поднимаются внутри цилиндра, касательного к внутреннему ядру и с осью, совпадающей с осью вращения Земли. Такие плюмы подвержены сильному закручиванию из-за быстрого вращения Земли. В ядре закрученные плюмы закручивают магнитные силовые линии, формируя так называемый полярный магнитный апвеллинг (ПМА). При достижении границы ядро-мантия, ПМА ведет к выталкиванию магнитных силовых линий в мантию и к формированию пары потоков магнитной концентрации, обнаруживаемой как пятна интенсивного радиального поля на поверхности ядра. Потоки противоположно направлены друг к другу.

Chulliat et al., [2010] считают, что причиной ускорения северного магнитного полюса является ПМА, расположенный под Новосибирскими островами. Прделанные ими расчеты показали поразительное совпадение модели радиального поля на границе ядро-мантия с наблюдаемым полем под Новосибирскими островами. Но высказанная ими причина ускорения СМП, по их же словам, остается гипотезой, реальность которой должна быть в дальнейшем оценена более тщательным численным моделированием.

6. ВЫВОДЫ

Ускоренное движение СМП прекратилось в районе 2003 г., достигнув значения ~62.5 км/год. Затем движение полюса начало замедляться и в 2009 г. его скорость уменьшилась до значения ~45 км/год. При этом следует отметить, что полюс стал немного разворачиваться в сторону Канады, сменив движение с северо-северо-западного направления на северо-западное. Так скорость движения полюса в исследуемом временном интервале (2001.5–2009) по широте уменьшилась с 58 до 35 км/год, в то время как скорость движения по долготе увеличилась с 23 до 32 км/год. Это дает основания надеяться, что северный полюс всегoнавсего “блуждает”, не покинет района Канадской аномалии и не достигнет примерно через 50 лет Сибири, как это прогнозировалось ранее.

Полученные результаты подтверждают выдвинутые ранее предположения о том, что неординарное поведение Северного магнитного полюса

в 70-х годах было вызвано джерком 1969–1970 гг. Очередное изменение характера движения полюса – начало замедления его движения – пришлось примерно на 2003 г., когда согласно ряду работ имел место последний джерк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бенькова Н.П., Винникова Т.Л., Тюрина Л.О. Геомагнитный эксцентричный диполь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 4. № 5. С. 917–923. 1964.
- Головкин В.П., Зверева Т.И., Чернова Т.А. Построение пространственно-временной модели главного геомагнитного поля по спутниковым данным // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 1. С. 133–141. 2009.
- Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. М.: Изд-во Московского центра непрерывного математического образования. 48 с. 2003.
- Кузнецов В.В. Положение северного магнитного полюса в 1994 г. // ДАН. Т. 348. № 3. С. 397–399. 1996.
- Кузнецов В.В. Прогноз положения южного магнитного полюса на 1999 г. // ДАН. Т. 361. № 2. С. 248–251. 1998.
- Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Фуде-Роуэл Т. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли // ДАН. Т. 409. № 5. С. 688–690. 2006.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: ЛГУ. 482 с. 1978.
- Aubert J., Aurnou J., Wicht J. The magnetic structure of convection-driven numerical dynamos // Geophys. J. Int. V. 172, 945–956, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03693.x, 2008.
- Chulliat A., Hulot G., Newitt L.R., Orgeval J.-J. What caused recent acceleration of the north magnetic pole drift? // EOS, Transactions, AGU. V. 91. № 51. P. 501–502. 2010.
- Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // Geophys. J. Int. V. 183. № 3. P. 1216–1230. 2010.
- Friis-Christensen E., Lühr H., Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field // Earth Planets Space. V. 58. P. 351–358. 2006.
- Hope E.R. Geotectonics of the Arctic ocean and the great arctic magnetic anomaly // J. Geophys. Res. V. 64. P. 407–427. 1959.
- Manda M., Dormy E. Asymmetric behavior of magnetic dip poles // Earth Planets Space. V. 55. P. 153–157. 2003.
- Newitt L.R., Chulliat A., Orgeval J.J. Location of the north magnetic dip pole in April 2007 // Earth Planets Space. V. 61. № 6. P. 703–710. 2009.
- Newitt L., Manda M., McKee L., Orgeval J. Recent acceleration of the north magnetic pole linked to magnetic jerks // Eos Transactions AGU. V. 83. № 35. P. 381. 2002.
- Olsen N., Manda M. Will the Magnetic North Pole Move to Siberia? // EOS Transactions AGU. V. 88. № 29. P. 293. 2007a.
- Olsen N., Manda M. Investigation of a secular variation impulse using satellite data: The 2003 geomagnetic jerk // Earth Planet. Sci. Lett. 255, 94–105, doi: 10.1016/j.epsl.2006.12.008, 2007b.
- Сайт Канадской геологической службы: http://cgc.rncan.gc.ca/geomag/nmp/northpole_e.php