

## ДИНАМИКА ГЛАВНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С 1900 ГОДА ПО НАШИ ДНИ

*Т. И. Зверева*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Рассмотрены изменения глобальных характеристик главного магнитного поля Земли с начала прошлого века. Речь идёт о перемещении магнитных полюсов Земли, о западном дрейфе, о магнитном моменте Земли, о глобальных магнитных аномалиях.

*Ключевые слова:* главное магнитное поле Земли, моделирование, западный дрейф.

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Модуль магнитного поля Земли, измеренный на поверхности земного шара, как известно, изменяется примерно от 25 000 нТл вблизи экватора до 65 000 нТл вблизи полюсов. Основная часть величины геомагнитного поля (~95 %) генерируется в жидком ядре Земли. Оно медленно изменяется со временем с периодами от 10 до 10 000 лет. Одной из глобальных характеристик главного поля является наличие мировых магнитных аномалий — отклонений измеренного поля от поля диполя до 20 % напряжённости в отдельных областях с характерными размерами до 10 000 км. Эти аномалии испытывают вековые вариации, в результате чего мировые аномалии смещаются, распадаются и возникают вновь. Самые крупные мировые аномалии: Восточно-Сибирская с повышенным значением модуля поля до ~62 000 нТл и Бразильская, или Южно-Атлантическая, с пониженным значением модуля поля до ~23 000 нТл. На примере последней хорошо прослеживается ещё одна глобальная характеристика поля — западный дрейф поля по долготе со скоростью  $0,2^\circ$  в год (см. рис. 5).

Намагнитченные породы в земной коре дают вклад в полное поле, в среднем, только несколько процентов (~4%), хотя коровое поле может локально достигать величины нескольких сотен или даже тысяч нанотесла вблизи поверхности Земли (например, Курская магнитная аномалия). На высотах низколетящих магнитометрических спутников последних десятилетий (приблизительно на 400-километровой высоте) коровое поле ослабевает до значений  $<30$  нТл. Поле ядра вместе с полем земной коры составляют внутреннее поле Земли.

В дополнение к этому в поле дают вклад внешние источники — электрические токи в ионосфере (на высотах от 90 до 1000 км) и магнитосфере (на расстояниях, больших нескольких радиусов Земли). Внешние поля очень динамичны, их величина может достигать значений, начиная от ме-

---

**Зверева** Татьяна Ильинична — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, zvereva@izmiran.ru

нее чем 1 нТл в геомагнитно спокойные периоды до нескольких сотен или даже тысяч нанотесла в возмущённые дни, с особенно большими амплитудами в полярных широтах.

## ПОСТРОЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГЛАВНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

До появления спутниковых съёмок обычно модели главного магнитного поля Земли и его вековой вариации получались путём разложения методом сферического гармонического анализа (СГА) среднегодовых значений поля в обсерваториях мировой сети с привлечением, если это было возможно, данных пунктов повторных измерений, данных аэромагнитных и гидромагнитных съёмок. Разработанный в 1839 г. великим К. Гауссом (Иоганн Карл Фридрих Гаусс, нем. Johann Carl Friedrich Gauß, 1777–1855) этот метод до сих пор широко используется в геомагнетизме. Основан он на предположении потенциальности поля, что даёт возможность представить его в виде ряда разложения по сферическим функциям.

В современных моделях рассматривают потенциал геомагнитного поля в виде:

$$\left. \begin{aligned} U(r, \theta, \lambda, t) = & a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left( g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda \right) \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} P_n^m(\cos \theta) + \\ & + a \sum_{n=1}^2 \sum_{m=0}^n \left( q_n^m(t) \cos m\lambda + s_n^m(t) \sin m\lambda \right) \left( \frac{r}{a} \right)^n P_n^m(\cos \theta), \\ X = & -\frac{1}{r} \frac{dU}{d\theta}, \quad Y = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{dU}{d\lambda}, \quad Z = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{dU}{d\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $U$  — геомагнитный потенциал в точке с географическими координатами  $r, \theta, \lambda$  (радиус, коширота и долгота);  $X, Y$  и  $Z$  представляют собой северную, восточную и вертикальную, направленную вниз, компоненты поля;  $a$  — средний радиус Земли;  $P_n^m(\cos \theta)$  — присоединённые функции Лежандра степени  $n$  и порядка  $m$  в нормировке Шмидта;  $g_n^m(t), h_n^m(t), q_n^m(t)$  и  $s_n^m(t)$  — коэффициенты разложения по сферическим функциям, зависящие от времени. При этом первый член в формулах (1) — потенциал внутреннего поля, а второй член — потенциал внешнего поля.

Как правило, временные изменения внутреннего поля моделируются путём разложения каждого коэффициента Гаусса  $g_n^m(t), h_n^m(t)$ , в ряд Тейлора вокруг эпохи моделирования до квадратичного члена, либо представляются сплайнами. Временные изменения внешнего поля, коэффициенты  $q_n^m(t)$  и  $s_n^m(t)$ , рассчитываются с учётом  $Dst$ -индекса как параметра в разложении (1), получаемого по обсерваторским данным. Такая аппроксимация позволяет скорректировать внутреннее поле, так как учитывает индуцированные токи в слабо проводящей мантии.

Такая процедура позволяет рассчитать коэффициенты  $g_n^m(t), h_n^m(t)$ , описывающие внутреннее геомагнитное поле, источниками которого являются ядро Земли и кора. Теория потенциала не даёт нам возможности

разделить поля от этих двух источников. Тогда прибегают к методу разделения полей по пространственному признаку, основанному на энергетическом спектре. Определяется пространственный энергетический спектр на поверхности Земли как

$$R_n = (n+1) \sum_{m=0}^n \left[ (g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right]$$

и представляет собой энергию поля, заключённую в некотором объёме, в той или иной гармонике поля.

На рис. 1 представлен пространственный энергетический спектр геомагнитного поля, полученный по результатам анализа данных спутника CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload). Очевидно, что дипольный член ( $n = 1$ ) много выше всех остальных. Следующий участок спектра описывает главные структурные особенности поля (мировые аномалии) ( $2 \leq n \leq 7$ ). Участок  $8 \leq n \leq 14$  отражает вклад более мелких источников, расположенных вблизи границы ядро-мантия. Участок спектра  $n > 14$  описывает вклад коровых аномалий и в значительной степени ошибку определения коэффициентов.

Следует отметить, что современные модели СГА (сферический гармонический анализ), построенные для изучения аномального поля, содержат в своём разложении гармоники до  $n = 720$ . Утверждается, что коровое поле содержится в гармониках  $16 \leq n \leq 720$  и соответствует диапазону длин волн от 2500 до 56 км. Главное поле рассчитывается до гармоник  $\leq 13$ .

В настоящее время для решения различных задач доступны данные примерно 150 наземных магнитных обсерваторий, которые крайне неравномерно распределены по земному шару с большими пробелами в океанах. И хотя в последнее время были предприняты значительные усилия для создания обсерваторий на отдалённых островах, только появление в последние несколько десятилетий низкоорбитальных спутниковых магнитных съёмок на протяжённом временном интервале привело к качественному и количественному изменению исходных данных.

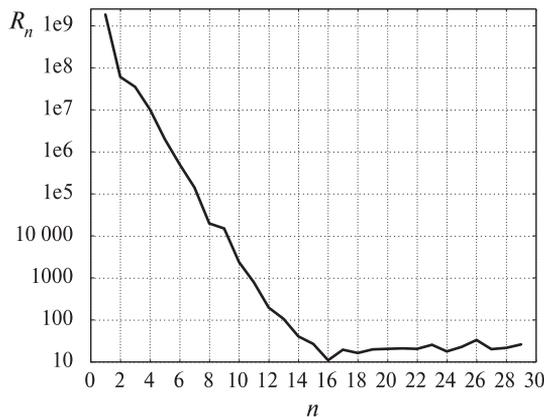


Рис. 1. Пространственный энергетический спектр СГА-модели, построенной по спутнику CHAMP

Известно, что мгновенное измерение поля в некоторой точке является суммой полей как внутриземной, так и внеземной природы, как видно из формул (1). Спецификой моделирования главного поля с использованием спутниковых данных является то, что источники магнитных полей, производимых токами в ионосфере, являются для описанной методики как бы внутренними. И не являясь потенциальными, не могут быть описаны формулами (1). Традиционным и наиболее простым методом устранения ошибок, связанных с этим, при создании моделей главного поля является минимизация вклада внешних полей путём селекции данных, основанная на различных критериях, учитывающих индексы магнитной активности, солнечный зенитный угол, параметры межпланетного магнитного поля. Чтобы избавиться от полей внешних источников, берутся только спокойные дни с  $k_p < 1+$  и  $|Dst| < 10$  нТл,  $|dDst/dt| < 3$  нТл/ч. Для уменьшения вклада от ионосферных токов берутся только средние и низкие широты и только ночные данные (от 23:00 до 5:00 ч локального времени). Векторные данные используются только для широт  $|\varphi| < 50...55^\circ$ , в остальных широтах — скалярные данные, что вносит широтную неоднородность. Для уменьшения вклада от ионосферных токов в полярных шапках берутся только данные в периоды, когда  $B_x$  и  $B_y$  межпланетного магнитного поля удовлетворяют условию:  $|B_x|, |B_y| < 3...10$  нТл, а  $0 < B_z < 6$  нТ. Вводятся ограничения на скорость солнечного ветра ( $< 450...550$  км/с). При такой селекции большая часть данных отбрасывается и исчезает преимущество спутниковых данных — однородность в пространстве и во времени, которая играет чрезвычайно важную роль при создании моделей СГА. Надо заметить, что при большом количестве измерений, что характерно для спутников, появление «пустых» мест в данных гораздо сильнее искажает модель, чем если искусственно уменьшить количество данных, например, разрядить их. Тут играет роль степень неоднородности данных в пространстве и во времени. Очевидно, возникшая неравномерность данных будет существенно влиять на точность созданных моделей. Но как и в какой степени, этот вопрос остаётся открытым.

Существует другой подход к моделированию главного геомагнитного поля, развитый в ИЗМИРАН и основанный на предположении, что поля источников, обусловленные различными процессами, протекающими в разных средах, должны иметь разные временные и пространственные характеристики. Другими словами, пространственные структуры полей разных источников и их временной ход не должны коррелировать друг с другом. Тогда к данным без какой-либо селекции может быть применён метод разложения на естественные ортогональные составляющие (ЕОС), и в качестве модели главного поля будут использованы только те составляющие, которые имеют источники внутри Земли. Это предположение легло в основу настоящей методики, подробно изложенной в работах [Головков и др., 2007, 2009]. Что при этом получается, коротко поясним на примере данных спутника СНАМР за период с 2001 по 2006 г. В первую ЕОС-составляющую выделился вековой ход, во вторую — вековое ускорение, в третью —  $Dst$ -вариация, в пятую — годовая вариация, в четвёртую и шестую — высокочастотные вариации, не содержащие тренда, что говорит в пользу того, что их нельзя отнести к вековому ходу.

Метод ЕОС, в данной методике применённый к спутниковым данным, хорош ещё и тем, что помимо временных характеристик источников, на которые «разделилось» измеренное поле, он даёт сферические гармонические модели каждого источника, по которым можно построить пространственную картину источника. Относительно двух последних источников по построенным картам можно увидеть, что оба они находятся в высоких широтах, носят случайный характер и вносят примерно одинаковый вклад в измеренное поле. То, что они вошли в разные составляющие, означает лишь то, что источники эти разнесены по долготе. Таким образом, не проводя никакой предварительной селекции данных, мы разделили измеренное поле на поля от различных источников и можем убрать нежелательные из главного поля.

### ИЗМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В XX–XXI СТОЛЕТИЯХ

Речь пойдёт прежде всего о магнитных полюсах Земли, о перемещении центров глобальных магнитных аномалий, о западном дрейфе, о магнитном моменте Земли. Необходимо отметить, что для простоты изложения северным магнитным полюсом (СМП) будем называть полюс, находящийся в Северном полушарии, что и принято в большинстве публикаций на эту тему.

По модельным и измеренным данным известно, что с начала XVII века у СМП периоды блуждания и замедления сменялись периодами почти прямолинейного движения (с 1760 по 1820 г. и с 1904 по 2001 г.). Южный магнитный полюс (ЮМП) приблизительно до 1700 г. двигался по направлению к южному географическому полюсу, затем развернулся и начал движение в сторону юго-восточной оконечности Индийского океана. Из сказанного выше, а также из рис. 2 видна полная асимметрия движения СМП и ЮМП. К примеру, начиная с 1900 по 2010 г., СМП переместился на ~1800 км, а ЮМП передвинулся на расстояние на порядок меньшее.

Северный магнитный полюс, покинув в 1990-х гг. территорию Канады, до сих пор движется в 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 ведущим мировым магнитологам заявить, что при таком темпе и направлении движения полюса он примерно через 50 лет может достичь Сибири, минуя при этом Северный географический полюс, обогнув его с запада.

Измерение магнитных полюсов — задача сложная, так как оба полюса находятся уже продолжительное время в океанах. Поэтому в последние годы рассчитывают магнитные полюса по моделям. Модельные полюса ( $n = 13$  в формуле (1)) с появлением спутниковых измерений дают значения полюсов, близкие к измеренным. Современные модели главного магнитного поля Земли, в частности, эталонная международная модель IGRF последних генераций, содержит 195 коэффициентов разложения.

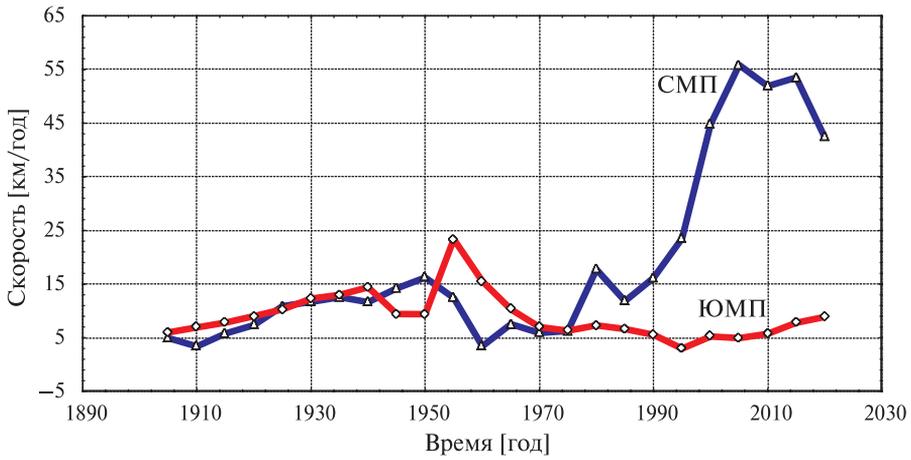


Рис. 2. Кривые скорости движения СМП и ЮМП с 1900 по 2015 г. Построены по модели IGRF-12 (International Geomagnetic Reference Field)

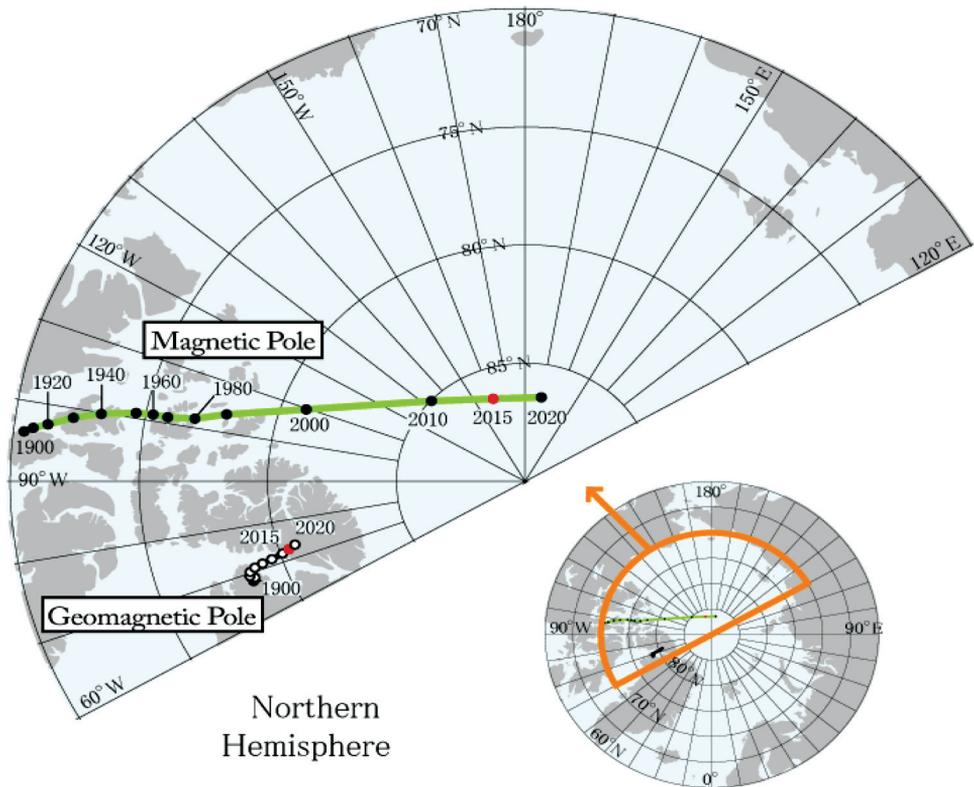
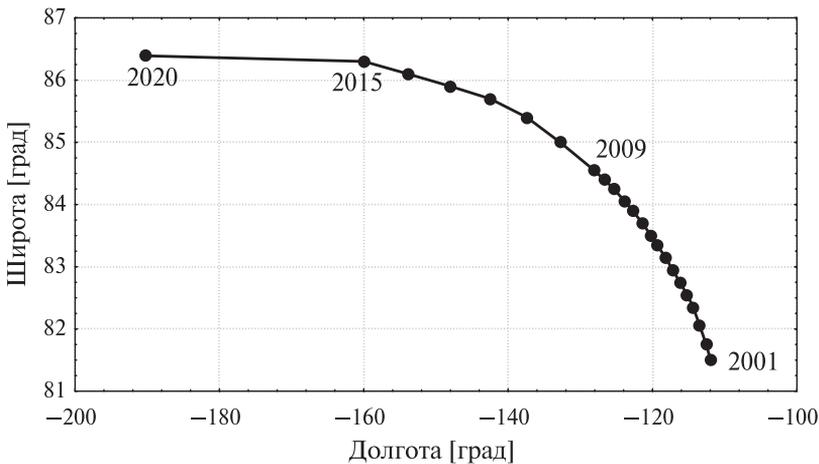


Рис. 3. Движение северного магнитного полюса (Magnetic Pole) и дипольного полюса (Geomagnetic Pole) с 1900 по 2020 г. Построено по последней генерации международного эталонного магнитного поля IGRF-12



**Рис. 4.** Перемещение СМП, начиная с 2001 г. Точка 2020 г. синтезирована по модели IGRF-12 как прогнозная. Кривая для наглядности построена в прямоугольных координатах

Широко используется в задачах, связанных с изучением внешнего поля Земли, дипольный полюс, рассчитанный по первым трём коэффициентам разложения (1). На рис. 3 представлены перемещения северного магнитного полюса и дипольного полюса с 1900 по 2020 г., построенные по последней генерации международного эталонного магнитного поля IGRF-12.

Все прогнозы движения СМП, о которых говорилось выше, базируются, в основном, на различных сферических гармонических моделях главного геомагнитного поля, чаще всего на моделях IGRF, которые обновляются каждые пять лет, и поэтому прогнозные оценки являются достаточно грубыми.

На рис. 4 представлено перемещение СМП по моделям, построенным по данным спутников CHAMP с полугодовым интервалом (2001–2009) [Зверева, 2012] и модели IGRF-12 (с годовым интервалом после 2009 г.), что дало возможность не только оценить скорость движения полюсов и другие характеристики магнитного поля, но и изменение направления их движения.

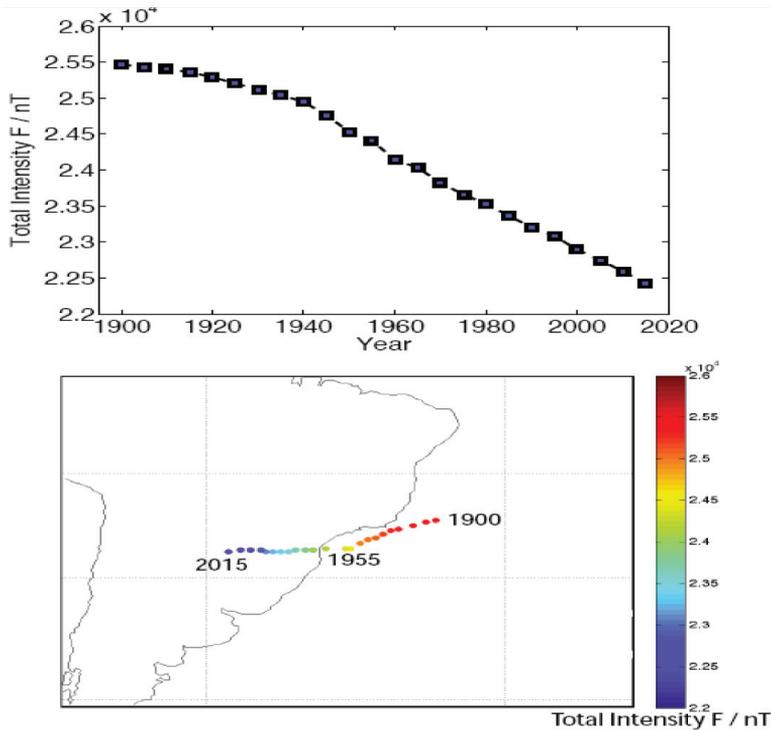
Северный магнитный полюс передвинулся за период с 2001 по 2015 г. на ~700 км, в то время как южный — всего на ~75 км. Скорость СМП в этом временном интервале изменялась в пределах 45...62,5 км/год, а скорость ЮМП не превышала значения 8,5 км/год за весь рассматриваемый период.

Далее речь пойдёт о СМП. За период времени с 1900 по 2010 г. СМП передвинулся на ~1757 км. С 1900 по 1970 г. он сместился на ~622 км, а с 1970 по 2010 г. — на ~1135 км. Начав ускоряться в 70-х гг. прошлого столетия, он двигался с ускорением до ~2003 г., достигнув значения примерно 62,5 км/год. Затем движение полюса начало замедляться и после 2009 г. оставалось на значении примерно 50 км/год. При этом следует отметить, что полюс стал разворачиваться в западном направлении. На рис. 4 видно, что движение СМП сменило направление с северо-северо-западного (2001)

на практически западное (после 2015 г.). Исходя из сегодняшней тенденции передвижения СМП, можно прогнозировать его дальнейшее перемещение на запад вокруг географического полюса. Сделает он петлю вокруг северного географического полюса или всё-таки пойдёт по направлению к России, увидим в будущем.

Дипольные полюса переместились с 1900 по 2015 гг. на  $\sim 170$  км. При этом северный дипольный полюс двигался вначале на юго-восток со скоростью, не превышающей 1 км/год, затем в 1940-х гг. развернулся и начал движение в северо-западном направлении с небольшим ускорением. Угол наклона диполя с осью вращения Земли медленно увеличивался от  $11,32^\circ$  в 1900 г. до максимального значения  $11,45^\circ$  в 1950 г., затем начал равномерно уменьшаться до минимального значения  $9,6^\circ$  в 2015 г. (Понятно, что южный геомагнитный полюс двигался центрально-симметрично северному.)

Эксцентричный диполь в последние годы находится под Марианскими островами. Проекция центра эксцентричного диполя из центра Земли на её поверхность движется на северо-запад-запад. Расстояние магнитного центра эксцентричного диполя от центра Земли увеличивается со средней скоростью 2 км/год и в настоящий момент равно  $\sim 560$  км.



**Рис. 5.** Движение Южной Атлантической аномалии с 1900 г. Верхняя кривая показывает, как минимум модуля магнитного поля  $F$  (который наблюдается в центре Бразильской аномалии) (Total Intensity) уменьшается с 1900 г. до наших дней. На нижней кривой показаны точки локализации минимума модуля поля в зависимости от времени [Finlay et al., 2010]

Важными характеристиками главного геомагнитного поля являются западный дрейф и мировые магнитные аномалии. Поведение Бразильской аномалии в последние сто с небольшим лет представлено на рис. 5.

Точка локализации минимума движется на запад практически равномерно со скоростью 0,2 град/год, т. е. величина западного дрейфа остаётся неизменной.

### ВЫВОДЫ

Очевидно, что последние несколько десятилетий Земля ведёт себя несколько неординарным образом. Это проявляется во всех областях геофизики, в частности и в магнитном поле. В основном настораживают увеличивающиеся скорости происходящих процессов. Относительно возможности наступления инверсии магнитного поля можно сказать следующее. 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. Кроме того, в течение уже очень длительного времени магнитный момент Земли уменьшается, что всегда происходит в таких случаях. Некоторые учёные считают, что инверсия уже началась, так как доподлинно известно, что по меньшей мере 2000 лет магнитный момент Земли падает. Но ничего определённого по этому поводу сказать пока нельзя, так как масштаб такого явления, как инверсия, может достигать десятка тысяч лет. Но, безусловно, требуется тщательный мониторинг всех геофизических процессов.

Ускоренное движение СМП прекратилось в районе 2003 г., достигнув значения ~62,5 км/год. Затем движение полюса начало замедляться. В последние годы скорость перемещения СМП колеблется около 50 км/год. При этом следует отметить, что движение СМП сменило направление с северо-северо-западного (2001) на практически западное (после 2015 г.). Исходя из сегодняшней тенденции передвижения СМП, можно прогнозировать его дальнейшее перемещение на запад вокруг географического полюса. Сделает он петлю вокруг северного географического полюса или всё-таки пойдёт по направлению к России, покажет будущее.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Головков и др., 2007] *Головков В. П., Зверева Т. И., Чернова Т. А.* Метод создания пространственно-временной модели главного магнитного поля путём совместного использования методов сферического гармонического анализа и естественных ортогональных компонент // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47. № 2. С. 272–278.
- [Головков и др., 2009] *Головков В. П., Зверева Т. И., Чернова Т. А.* Построение пространственно-временной модели главного геомагнитного поля по спутниковым данным // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. № 1. С. 133–141.

[Зверева, 2012] *Зверева Т.И.* Динамика магнитных полюсов Земли в последнем десятилетии // Геоматнезизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 2. С. 278–286.

[Finlay et al., 2010] *Finlay C. C., Maus S., Zvereva T. I.* International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation // Geoph. J. Intern. 2010. V. 183. No. 3. P. 1216–1230.

## **DYNAMICS OF THE MAIN GEOMAGNETIC FIELD FROM 1900 TO TODAY**

*T. I. Zvereva*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

The changes of the global characteristics of the main magnetic field of the Earth since the beginning of the last century up to now are considered. We are talking about moving the Earth's magnetic poles, the west drift, the magnetic moment of the Earth, about global magnetic anomalies.

*Keywords:* Earth's main field, geomagnetic field modeling, west drift.

---

**Zvereva** Tatiana Iljinichna — senior researcher, PhD, [zvereva@izmiran.ru](mailto:zvereva@izmiran.ru)