ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2019, том 59, № 3, с. 380–382

УДК 550.384.7

ПРЕДСТОЯЩАЯ ИНВЕРСИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МАГНИТОСФЕРЫ

© 2019 г. В. Г. Петров*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

**e-mail: vpetrov@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 04.04.2018 г.
После доработки 01.10.2018 г.
Принята к публикации 24.01.2019 г.

По данным модели IGRF-12 проанализировано изменение глобальной структуры внутренних источников магнитного поля Земли. Наряду с уменьшением дипольного магнитного момента происходит быстрый рост мультипольных моментов. Это подтверждает теоретическую модель инверсии магнитного поля как постепенное уменьшение дипольного поля при сохранении, в общем, его направления и усиление мультипольных моментов. Палео- и археомагнитные данные показывают, что этот процесс происходит уже ≈2.5 тыс. лет и многократно повторялся в прошлом. Уменьшение дипольного магнитного момента приводит к приближению магнитопаузы к Земле и полному исчезновению магнитосферы через ≈1.5 тыс. лет.

DOI: 10.1134/S0016794019030106

1. ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение магнитного момента Земли наблюдается в течение всего периода инструментальных измерений магнитного поля. При этом происходит ускоренное перемещение магнитных полюсов. Палеомагнитные данные [Cande and Kent, 1995] показывают, что в истории Земли уменьшение поля до нуля и его возникновение, но уже другого направления (инверсии), наблюдались многократно. Текущее направление магнитного поля сохраняется в течение ≈785 тыс. лет, и такой интервал сохранения постоянной полярности магнитного поля существенно превышает средний за всю наблюдаемую историю интервал между инверсиями [Lowrie and Kent, 2013]. Таким образом, можно ожидать, что очередная инверсия уже приближается и имеются достаточно убедительные признаки начала процесса изменения полярности магнитного поля Земли.

2. ПРИЗНАКИ НАЧАЛА ПЕРЕПОЛЮСОВКИ

Достоверные измерения магнитного момента Земли имеются с 1900 г., когда начали регулярно создавать модели магнитного поля Земли. На рисунке 1 представлено изменение магнитного момента, вычисленное по данным коэффициентов h_0, h_1, g_1 модели IGRF [Thebault et al., 2015] и его линейная интерполяция. Менее достоверные данные показывают, что такое же линейное уменьшение наблюдается, по крайней мере, с 1850 г. (модель GUFM – [Jackson et al., 2000], а косвенные данные показывают, что уменьшение длится уже ≈2.5 тысячи лет [Yang et al., 2000].

Точность палеомагнитных данных не дает однозначной картины самого процесса переполюсовки, а наше понимание процессов геодинамо не достаточно для получения количественных оценок этого процесса, хотя качественные оценки сделать уже можно. Возможны три механизма переполюсовки:

1) диполь сохраняет свое направление, но уменьшается до нуля, а затем появляется вновь, но уже другого знака;

2) постепенный поворот диполя через экватор без существенного изменения его величины [Constable, 2003];

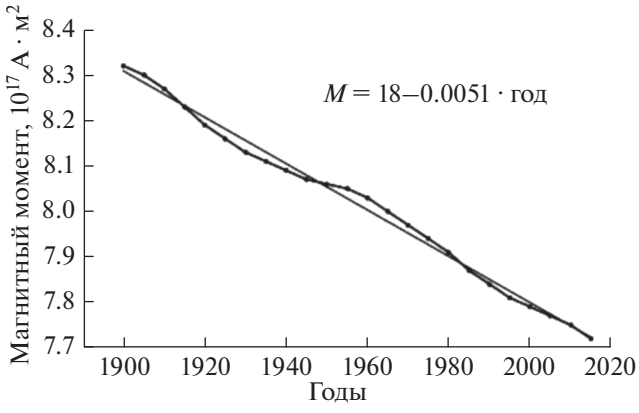

Рис. 1. Изменение магнитного момента Земли.

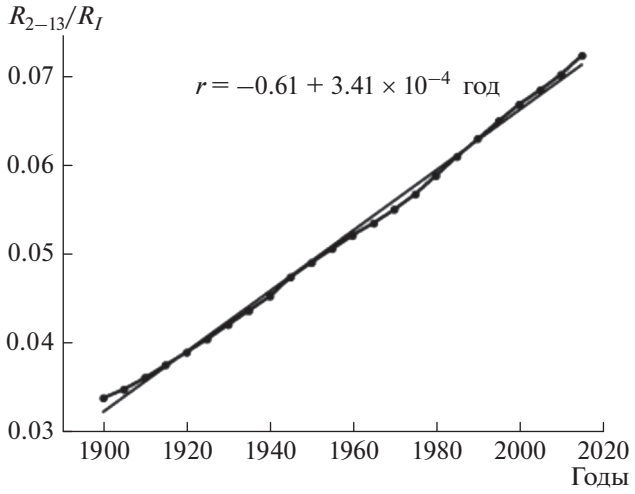

Рис. 2. Отношение суммарной мощности мультипольных членов модели IGRF к дипольному члену.

3) переход энергии магнитного поля из дипольного члена без значительного изменения его направления в мультипольные и обратный переход из мультипольных в дипольный противоположного направления.

Анализ палеомагнитных данных, особенно во время последнего изменения ≈785 тыс. лет назад так и не позволил сделать однозначный выбор в пользу какого-то механизма. Первые анализы поддерживали второй вариант, но более поздние работы [Valet and Fournier, 2016] и ссылки в ней свидетельствуют в пользу третьего варианта.

Существует два определения магнитного полюса Земли – просто магнитный полюс – точка, где магнитное поле направлено вертикально, и геомагнитный полюс – точка пересечения оси геомагнитного диполя с поверхностью Земли. Источники дипольного поля находятся на глубинах больше 3000 км, мультипольные источники, которые искажают поле диполя и приводят к отличию положения магнитного и геомагнитного полюсов, находятся ближе к поверхности. На рисунке 3 в работе [Зверева, 2012] приведено перемещение обоих полюсов в 1990–2010 гг. и видно, что смещение геомагнитного полюса на порядок меньше смещения магнитного полюса, т.е. сам магнитный диполь уменьшается по величине почти не меняя положения, а смещение магнитного полюса вызывается усилением мультипольного поля. Таким образом, эти данные говорят в пользу первого или третьего вариантов переполюсовки.

Соотношение вклада дипольного и мультипольных источников можно оценить и непосредственно. Для оценки энергетического вклада различных пространственных составляющих магнитного поля в общую энергию используется понятие энергетического спектра магнитного поля, где вклад каждой пространственной гармоники вычисляется по формуле [Backus et al., 1996],

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

где R_n описывает энергетический вклад гармоники n в полную энергию поля. Для оценки относительного вклада дипольной и мультипольных составляющих в полную энергию поля нами было рассчитано отношение суммарной мощности всех мульпипольных гармоник (n = 2–13) к дипольной (n = 1). Под дипольным членом здесь понимается наклонный диполь, описываемый тремя первыми членами разложения. Результат представлен на рис. 2.

Из рисунка 2 видно, что за последние 120 лет это отношение увеличилось более чем в два раза, причем увеличение происходит не только за счет уменьшения мощности дипольного члена (в этом случае отношение изменилось бы только в 1.16 раза), но и за счет заметного увеличения мощности мультипольных членов. Таким образом, имеющиеся на настоящее время данные показывают, что процесс изменения полярности магнитного поля начался по 3-му варианту. Однако в настоящее время убывание энергии дипольной составляющей происходит быстрее, чем рост мультипольной, т.е. общая энергия магнитного поля уменьшается.

3. ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРЫ В ПРОЦЕССЕ

Процесс взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли в значительной степени зависит от свойств самой магнитосферы, в частности от величины магнитного поля Земли, которое определяется магнитным моментом земного диполя. Наиболее характерной величиной, описывающей структуру магнитосферы, является расстояние до подсолнечной точки магнитосферы. Существует несколько методик и формул для определения этого расстояния, и наиболее распространенный подход изложен в работе [Paschmann, 1964]. В простейшем приближения считают, что расстояние до подсолнечной точки определяется балансом давления в солнечном ветре и в магнитосфере:

$$p_{MS} + \frac{B_{MS}^2}{2\mu_0} = p_M + \frac{B_M^2}{2\mu_0},$$

где p – это тепловое давление плазмы; $B^2/2\mu_0$ – давление магнитного поля, а индексы MS и M относятся соответственно к магнитослою и магнитосфере.

Считая, что в лобовой точке динамическое давление солнечного ветра уравновесилось давлением магнитного поля и пренебрегая магнитным полем в солнечном ветре и тепловым давлением плазмы в магнитосфере, упростим это выражение до

$$\rho_{SW} v_{SW}^2 = \frac{B_M^2}{2\mu_0},$$

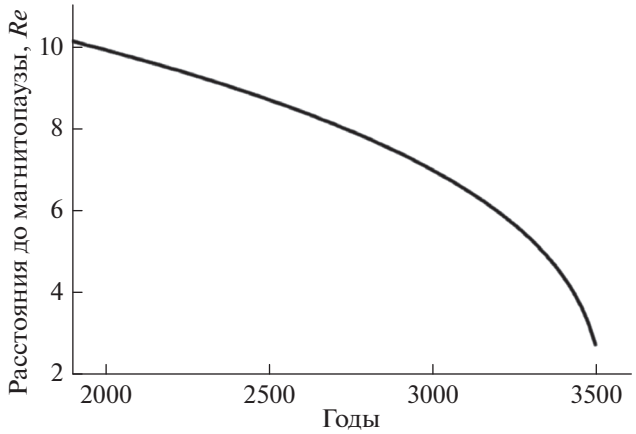

Рис. 3. Среднее расстояние до подсолнечной точки магнитосферы в радиусах Земли.

а считая магнитное поле Земли дипольным, получаем следующую зависимость расстояния до подсолнечной точки r_0 [Mead, 1964]:

$$r_0 = \left(\frac{f^2 M_E^2}{8k\pi n m_p v^2} \right)^{1/6}, \quad (1)$$

где M_E – магнитный момент земного диполя; m_p – масса протона; n – плотность протонов; v – скорость солнечного ветра. Коэффициент f определяет степень усиления дипольного поля токами на магнитопаузе, для 3-мерной модели $f = 2.44$, параметр $k = 0.88$ [Spreiter et al., 1968].

Если считать, что магнитный момент будет уменьшаться с той же скоростью, что и сейчас, то по формуле (1) можно прогнозировать уменьшение среднего расстояния до подсолнечной точки магнитосферы (рис. 3). Здесь характерным временем является 3000–3100 гг., когда лобовая точка приблизится к геостационарной орбите. До этого времени уменьшение расстояния со временем будет происходить примерно линейно, затем скорость уменьшения увеличится, и примерно к 3600 г. магнитосфера Земли исчезнет. Изменение размеров магнитосферы изменит и ее внутреннюю структуру, однако современные модели внутренней магнитосферы содержат ряд экспериментальных параметров, которые определены для современной структуры магнитосферы, поэтому спрогнозировать эти изменения очень сложно.

Конечно, экстраполяция 200-летнего интервала на 1500 лет вперед – процедура не очень надежная, однако имеется много палеомагнитных данных, которые хотя и не позволяют выяснить детали процесса уменьшения и даже смены знака магнитного диполя, уверенно доказывают факт наличия такого процесса. Исследование намагниченности археологических остатков позволяет оценить и величину магнитного поля. Конечно, по достоверности и точности они не сопоставимы с современными моделями МПЗ, но они указывают, что уменьшение магнитного момента наблюдается в течение уже 2.5 тыс. лет [Yang et al., 2000].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся в настоящее время данные о динамике главного магнитного поля Земли показывают явные признаки начавшегося процесса переполюсовки (или, по крайней мере, экскурса) магнитного поля Земли. Уменьшение дипольного момента при общем сохранении его направления и еще более быстрый рост мультипольных моментов свидетельствуют в поддержку одного из трех возможных механизмов переполюсовки. При сохранении темпа уменьшения магнитного момента лобовая точка магнитосферы окажется внутри геостационарной орбиты после 3000 г., и магнитосфера исчезнет полностью к 3600 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– *Зверева Т.И.* Динамика главного магнитного поля Земли с 1900 г. по наши дни / Тр. науч. конф. “Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований”, 22–26 мая 2012 г. М.: ИЗМИРАН, 2012.

– *Backus G., Parker R.L., Constable C.* Foundations of geomagnetism. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

– *Cande S.C., Kent D.V.* Revised calibration of geomagnetic polarity timescale for later Cretacerous and Cenozoic // J. Geophys. Res. V. 100(B4). P. 6093–6095. 1995.

– *Constable C.G.* Geomagnetic reversals: rates, timescales, preferred paths, statistical models, and simulations. Earth’s core and lower mantle // Fluid mechanics of astrophysics and geophysics. Eds. Jones C.A., Soward A.M., Zhang K. London, N.Y.: Taylor and Francis, P. 96–122. 2003.

– *Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R.* Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // Philos. Trans. R. Soc. Lond., A 358. P. 957–990. 2000.

– *Lowrie W., Kent D.V.* Geomagnetic polarity timescales and reversal frequency regimes / Timescales of the Paleomagnetic Field. Eds. Channell J.E.T., Kent D.V., Lowrie W., Meert J.G. / Geophysical Monograph Series. V. 145. P. 117–129. 2013.

– *Mead C. D.* Deformation of the geomagnetic field by the solar wind // J. Geophys. Res. V. 69. P. 1181–1195. 1964.

– *Paschmann G.* The Earth’s magnetopause // Geomagnetism.V. 4. P. 295–331. 1991.

– *Spreiter J.R., Alksne A.Y., Summers A.L.* External aerodynamics of the magnetosphere / Physics of the magnetosphere. Eds. Corovillano R.L., McClay J.F., and Radoski H.R. Dordrecht: D. Reidel. P. 301–364. 1968.

– *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth Planets Space. P. 67–79. 2015.

– *Yang S., Odah H., Shaw J.* Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years // Geophys. J. Int. V. 140. P. 158–162. 2000.

– *Valet J.-P., Fournier A.* Deciphering records of geomagnetic reversals // Rev. Geophys. V. 54. P. 410–446. 2016. doi 10.1002/2015RG000506