

Поведение геомагнитного поля во время инверсий и экскурсов

М. Ю. Решетняк^{1,2,*}¹Институт физики Земли РАН, Россия, 123995, Москва, Б. Грузинская, 10²Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН
Россия, 142190, Москва, Калужское ш. 4

(Поступила в редакцию 30.11.2023; после доработки 14.12.2023; подписана в печать 15.12.2023)

На примере трехмерной модели геодинамо показано, что при небольших амплитудах тепловых источников во время инверсий и экскурсов геомагнитного поля наблюдается затухание не только дипольного магнитного поля, но и поля высоких гармоник. При таком сценарии магнитосфера Земли может быть существенно меньше, чем ожидалось ранее, а количество проникшей на Землю радиации, соответственно, больше.

PACS: 47.65.Md. УДК: 537.84.

Ключевые слова: палеомагнетизм, магнитосфера, динамо, инверсии.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.79.2410901

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое на поверхности Земли магнитное поле, генерируемое в жидком ядре процессом динамо, является уникальным источником информации о процессах, происходящих на глубине более трех тысяч километров. Процесс динамо представляет собой трансформацию кинетической энергии проводящих течений в ядре в энергию магнитного поля [1]. Конвекция, в свою очередь, поддерживается остыванием планеты и ростом твердого ядра и связанной с ним дифференциацией вещества в ядре. По оценкам, магнитное число Рейнольдса в ядре порядка $R_m = \frac{VL}{\eta} \sim 500$ [2], где V — характерная скорость, L — масштаб ядра, η — коэффициент магнитной диффузии. Такая величина R_m предполагает существование пространственного магнитного спектра протяженностью в две-три декады. Поскольку ядро отделено от наблюдателя толстым слоем мантии, на поверхность Земли проникает лишь крупномасштабное магнитное поле. Мелкомасштабная же составляющая быстро убывает с расстоянием от ядра, в том числе и за счет скин-эффекта, связанного с небольшой, но все же конечной проводимостью мантии.

В силу применимости потенциального приближения для крупномасштабного магнитного поля, следующего из отсутствия токов в мантии, описание магнитного поля удобно вести в терминах разложения по сферическим функциям, являющихся собственными функциями уравнения Лапласа для скалярного потенциала магнитного поля. Коэффициенты при сферических функциях называют коэффициенты Гаусса [3] при соответствующем выборе нормировки, носящей также его имя. Оказыва-

ется, что современное магнитное поле на поверхности Земли с точностью до 90% описывается полем магнитного диполя, наклоненным относительно оси вращения на угол 14° [4]. На временах порядка несколько десятков тысяч лет магнитный диполь прецессирует вокруг оси вращения. На больших же временах (от 100 тыс лет и более) полярность диполя может меняться. Такой процесс называется инверсией магнитного поля. Данное явление тесно связано с симметрией уравнений динамо относительно знака магнитного поля. Последняя инверсия была 780 тысяч лет назад [5]. Всего в истории Земли в настоящее время насчитывается более 500 инверсий. Наблюдатели также регистрируют кратковременные уменьшения амплитуды магнитного диполя, которые также могут сопровождаться (или нет) сменой знака, с последующим возвратом в прежнее состояние. Такое явление получило название экскурса магнитного поля.

Как правило, во время инверсий, в силу специфики палеомагнитных наблюдений, измерениям доступно только поведение магнитного диполя. Последнее связано в первую очередь с небольшим числом самих измерений, покрывающим в результате небольшую площадь Земли. Для ответа на вопрос, что происходит с магнитным полем на меньших масштабах, полезным оказывается численное моделирование. Ниже рассмотрено поведение магнитного поля на основе трехмерной модели геодинамо Magic [6], позволяющей воспроизвести последовательность экскурсов и инверсий с пространственным разрешением на несколько порядков более высоким, чем удается в наблюдениях.

Поскольку оценки проникновения радиации во время инверсии напрямую связаны с существованием не только дипольного магнитного поля, исследование важно для понимания последствий инверсий на биоту.

* E-mail: m.reshetnyak@gmail.com

1. ИНВЕРСИИ И ЭКСКУРСЫ В МОДЕЛЯХ ДИНАМО

Генерация магнитного поля является пороговым явлением: при достижении некоторого критического магнитного числа Рейнольдса R_m (в пределах интервала 10–100) появляется растущее магнитное поле. Для Земли это поле крупномасштабное и антисимметричное относительно экваториальной плоскости.

Существование дипольного геомагнитного поля тесно связано с суточным вращением Земли. К этому выводу можно подойти с различной степенью строгости. Из самых простых качественных соображений можно предположить, что наиболее вероятным будет существование крупномасштабной конфигурации магнитного поля, с выделенным направлением, задаваемым осью вращения Земли. Именно крупномасштабное магнитное поле имеет наибольшее время затухания и, соответственно, требует наименьшего количества энергии для поддержания своего существования. Палеомагнитные наблюдения подтверждают это предположение: на больших временах (от 10 тыс лет и более) геомагнитное поле представляет собой поле осесимметричного диполя, ось которого совпадает с осью вращения Земли. Небольшие отклонения диполя от оси вращения порядка 10° в целом не меняют эту картину. На более строгом уровне модели динамо средних полей [7] предсказывают генерацию дипольного магнитного поля турбулентностью за счет двух эффектов: α и ω . Первый из них связан с корреляцией мелкомасштабной скорости \mathbf{v} и ее завихренности $\nabla \times \mathbf{v}$, вызванной, например, неоднородностью плотности или существованием твердых границ. Данный эффект описывает генерацию крупномасштабного магнитного поля турбулентностью. Второй эффект связан с сохранением момента импульса и также важен для генерации магнитного поля в быстровращающихся телах и описывает генерацию крупномасштабного магнитного поля крупномасштабными сдвиговыми течениями. При соответствующем подборе параметров уже в простых моделях $\alpha\omega$ -динамо удается получить дипольные конфигурации магнитного поля с и без инверсий [8].

Большой прогресс был достигнут в трехмерных моделях геодинамо. Геодинамо является уникальной системой, в которой генерируется практически осесимметричное магнитное поле принципиально не осесимметричными течениями. При небольших числах Рейнольдса форма течений представляет собой систему вытянутых вдоль оси вращения циклонов и антициклонов. Очевидно, что только трехмерные модели могут воспроизвести такого рода конвекцию. Другой чертой геодинамо, отличающей его, например, от солнечного, является достаточно толстая сферическая оболочка, позволяющая генерацию крупномасштабного поля с масштабом порядка ядра Земли, что как раз и подходит под дипольную конфигурацию. Уже на пороге генера-

ции в трехмерных моделях наблюдается дипольное магнитное поле [9].

Поскольку как увеличение скорости суточного вращения, так и увеличение интенсивности источников энергии приводит к увеличению градиентов физических полей, можно ожидать, что для генерации крупномасштабного магнитного поля существует и верхняя граница чисел Рейнольдса, выше которой диссипация магнитного поля становится слишком велика для поддержания крупномасштабного поля, дипольное магнитное поле разрушается. Численные эксперименты по трехмерным моделям [10, 11] и моделям среднего поля [8] подтверждают это предположение. Обратим также внимание, что из соображений симметрии при фиксированных параметрах увеличение интенсивности тепловых источников и связанных с ними центрально-симметричных сил плавучести приводит к относительному уменьшению влияния вращения. В этом случае, даже если магнитное поле и остается еще дипольным, то нет никаких оснований ожидать, что положение магнитного и географического полюсов будет совпадать на больших временах. Это соответствует режиму частых инверсий.

Обе границы существования дипольного магнитного поля сопровождаются частыми инверсиями, которые в обоих случаях вызваны разрушением дипольной компоненты. Очевидно, что морфология этих инверсий будет различна: вблизи первой границы разрушение дипольной компоненты равносильно угасанию всего магнитного поля, во втором же случае после прекращения генерации магнитного диполя будет оставаться мелкомасштабное магнитное поле. Амплитуда флуктуаций мелкомасштабного поля во время инверсий в этом случае может быть и больше, чем до инверсии. Из этого следует, что для первого сценария, при котором уменьшается все магнитное поле, возможно более яркое проявление последствий инверсии. Ниже, используя модель геодинамо Magic [6], мы рассмотрим первый сценарий развития инверсии.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Подробное описание псевдоспектральной модели Magic можно найти в [6, 11]. Тепловая конвекция проводящей жидкости в приближении Буссинеска во вращающемся сферическом слое вызвана разностью температур на его границах. Скорость течений на границах равна нулю, на внешней границе заданы вакуумные граничные условия для магнитного поля. Интенсивность тепловых источников задана числом Рэлея Ra . Значения Ra подобраны вблизи порога генерации магнитного поля. Расчеты выполнены для значений безразмерных чисел Прандтля, магнитного Прандтля, Экмана и Рэлея $Pr = 1$, $Pm = 20$, $E = 6.5 \times 10^{-3}$ и для двух значений числа Рэлея $Ra = 4 \times 10^5$ и 5×10^5 .

Как уже упоминалось выше, для изучения пове-

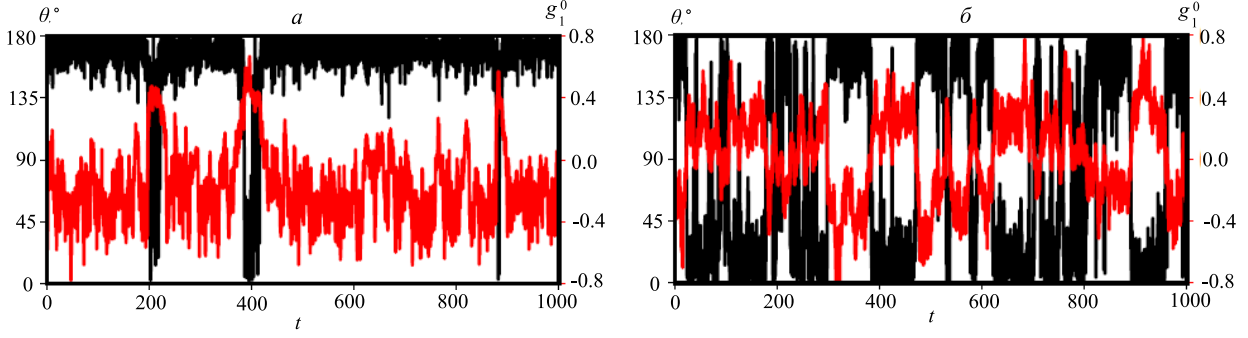


Рис. 1. Эволюция спектра Мауэрсбергера на границе ядро-мантия для двух чисел Рэлея $Ra = 4 \times 10^5$ (а) и $Ra = 5 \times 10^5$ (б) в модели геодинамо

дения магнитного поля за пределами жидкого ядра во время инверсий удобно использовать разложение магнитного поля $\mathbf{B} = -\nabla U$ по сферическим функциям, где скалярный потенциал U магнитного поля задан в виде ряда:

$$U = \sum_{l=1}^{l_0} \frac{a^{l+2}}{r^{l+1}} \sum_{m=0}^l \left(g_l^m \cos m\varphi + h_l^m \sin m\varphi \right) P_l^m(\cos \theta), \quad (1)$$

(r, θ, φ) — сферические координаты, P_l^m — присоединенные полиномы Лежандра, коэффициенты Гаусса g_l^m, h_l^m рассчитаны на поверхности жидкого ядра, l_0 — максимальный номер гармоники, a — радиус жидкого ядра. Коэффициенты g_1^0, g_2^0, g_3^0 соответствуют осесимметричному диполю, квадруполю и октуполю соответственно.

На рис. 1 представлена эволюция угла отклонения магнитного диполя от оси вращения и его амплитуда для двух значений числа Рэлея. На первом рисунке наблюдаются три экскурса магнитного поля, во время которых происходила кратковременная смена полярности при значительном уменьшении амплитуды диполя.

При большем значении Ra частота смен полярности возросла, но вместе с этим картина стала более симметричной: длительность интервалов противоположной полярности стала сравнимой. В палеомагнетизме такие смены полярности подпадают под определение инверсий геомагнитного поля. Обратим внимание, что в свете известных дискуссий о грядущей инверсии изменение амплитуды g_1^0 в 2–3 раза — типичное явление и не является предвестником инверсии.

В настоящее время существует целый набор параметров, позволяющий выявить сходство (или различие) модельных полей между собой или с наблюдаемым [12]. Далее мы остановимся на одном из таких критериев, а именно пространственном спектре магнитного поля, получившем название спектра Мауэрсбергера:

$$S(l) = \sum_{m=0}^l \left((g_l^m)^2 + (h_l^m)^2 \right). \quad (2)$$

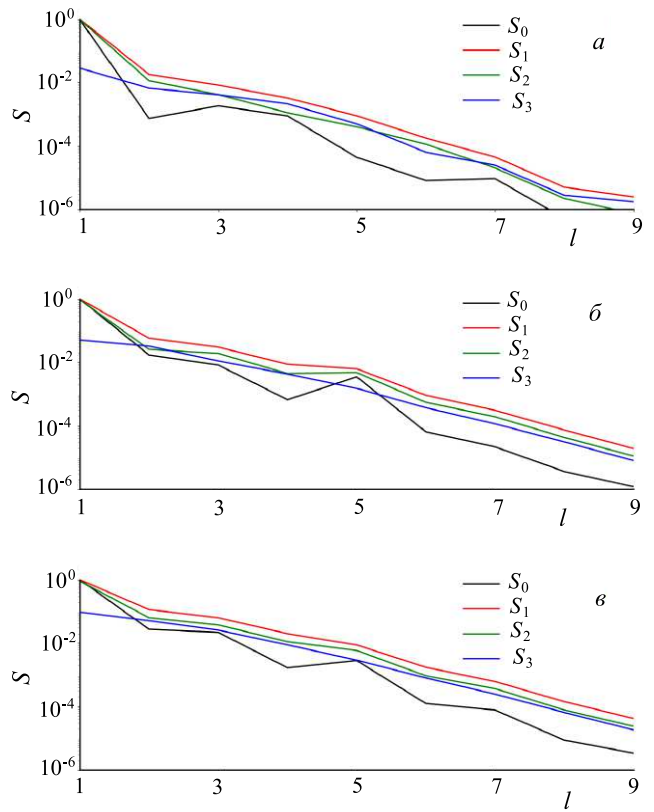


Рис. 2. Спектры Мауэрсбергера на поверхности Земли по модели *gufm1* (а) и для двух чисел Рэлея $Ra = 4 \times 10^5$ (б) и $Ra = 5 \times 10^5$ (в). S_0 — осесимметричная часть спектра, S_1 — весь спектр Мауэрсбергера, S_2 — антисимметричная относительно экватора составляющая, S_3 — симметричная. Значения нормированы на максимальное значение S_1

На рис. 2, а представлен осредненный по времени за последние 400 лет спектр Мауэрсбергера по модели *gufm1* [13] на поверхности Земли, основанный на наблюдениях, полученных из записей судовых журналов и обсерваторских измерений. Помимо преобладания дипольного поля, характерной особенностью является превышение антисимметричных относительно экватора гармоник S_2 ($k = m + l$ нечетно) над симметричными S_3 ($k = m + l$ четно). Как дипольность, так и последнее свойство

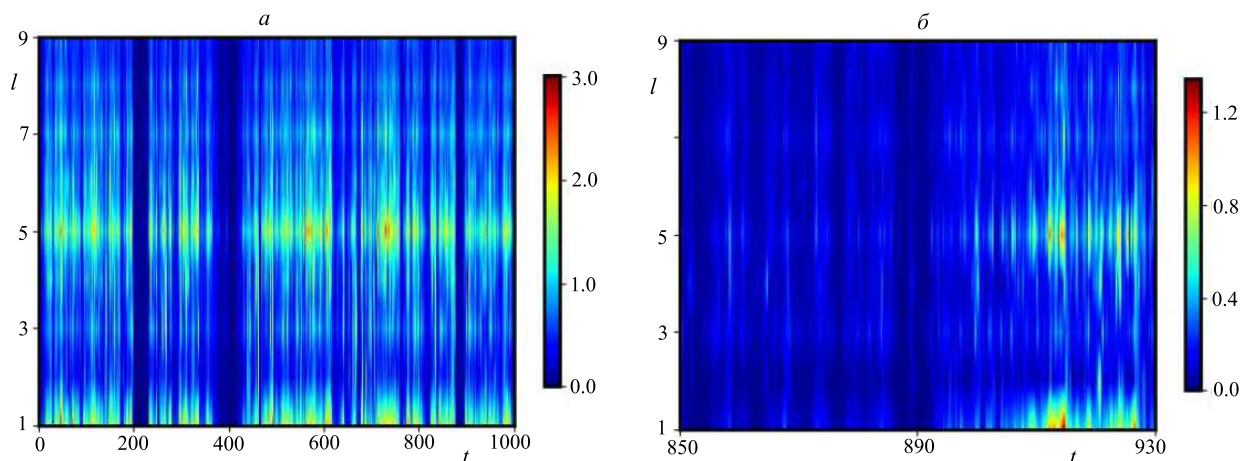


Рис. 3. Эволюция спектра Мауэрсбергера на границе ядро-мантия для двух чисел Рэлея $Ra = 4 \times 10^5$ (а) и $Ra = 5 \times 10^5$ (б) в модели геодинамо

наблюдаются и в модельных расчетах на рис. 2, б и 2, в, для которых осреднение выполнено по всему интервалу времени. Появление максимума при $l = 5$ в спектре модели геодинамо связано с существованием локального максимума кинетической энергии вблизи порога генерации при $m \sim E^{-1/3}$ [14]. При увеличении Ra максимум становится менее выраженным.

Во всех трех случаях на рис. 2 осесимметричная часть спектра S_0 , в которой учтены только моды с $m = 0$, оказывается менее плавной, чем для полного спектра, в котором учтены все моды m . Особенно это различие наблюдается для квадруполя. В наблюдениях квадруполь оказывается сильно не осесимметричным. Для модельных расчетов это не так выражено.

Численная модель позволяет проследить характеристики не только дипольного поля во время инверсий и экскурсов, но и более высоких гармоник. На рис. 3, а представлено поведение спектра $S_1(l)$ на поверхности ядра во времени. На рисунке наблюдаются вертикальные синие полосы во время экскурсов, соответствующие уменьшению магнитного поля на всех волновых числах, а не только на дипольном с $l = 1$. Анализ показывает, что магнитное поле затухает и внутри ядра Земли, а его магнитная энергия уменьшается как минимум на порядок во время экскурса. Подобное уменьшение магнитной энергии за счет уменьшения максвелловских напряжений приводит к дестабилизации течений, усилению конвекции и, как следствие, — восстановлению генерации магнитного поля.

Для более высоких чисел Рэлея масштаб времени становится меньше. Для удобства на рис. 3, б рассмотрена отдельная инверсия. Как и в случае экскурса, наблюдается затухание всех гармоник (темная полоса). Поскольку до инверсии амплитуда g_1^0 была невелика (см. рис. 1, б), спектры магнитного поля до и после инверсии отличаются. Слабая напряженность диполя до инверсии соответствует большому количеству экскурсов, не позволяющих

полностью восстановиться диполю. Здесь интересно напомнить, что вымирание биологических видов коррелирует не с отдельными инверсиями магнитного поля, а с их частотой. В случае отдельной инверсии, без большого числа экскурсов, спектр до и после инверсии одинаков.

3. ПРЕДСКАЗАНИЕ ИНВЕРСИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Согласно наблюдениям, инверсии магнитного поля скорее всего соответствуют случайному процессу на временах, больших $t_m \sim 10$ тыс. лет (время памяти), с параметрами, зависящими от внешних для жидкого ядра факторов: роста твердого ядра, теплового потока на границе ядро-мантия. Соответственно при фиксированных параметрах геодинамо на временах $\tau \gg \tau_m$ возможно лишь предсказание частоты инверсий, но не отдельной инверсии.

На временах, меньших τ_m , поведение магнитного поля удастся предсказывать. Такие попытки делались как для наблюдений [17], так и в трехмерных моделях геодинамо [18] с использованием метода ассимиляции данных. Этот метод предполагает наличие достаточного количества наблюдений и, соответственно, во время инверсий пока не применялся.

Попытки предсказания инверсии по наблюдательным данным на временах, существенно меньших τ_m , например с помощью линейной экстраполяции за последние несколько сот лет приводят к оценке появления следующей инверсии через 4.5 тыс. лет [15]. Что характерно, это время соответствует по порядку величины полупериоду основного цикла геодинамо, ставя под вопрос саму применимость метода. Анализ более длинных рядов геомагнитного поля за 12 тыс. лет [16] тем же методом приводит к предсказанию появления инверсии несколько тысяч лет назад. Поскольку временное разрешение записей геомагнитного поля с улуч-

пением методов измерения повышается, следует ожидать, что и вероятность предсказания инверсий будет также увеличиваться в будущем. К этому численному эффекту стоит относиться с должной степенью понимания.

В настоящее время у человечества нет опыта жизни во время инверсии. Обзор возможных последствий для биоты при некотором сценарии поведении магнитного поля дан в работе [15] и приведенной в ней ссылке. Авторы не дают однозначного ответа на степень таких последствий. Трудность анализа связана еще и с тем фактом, что количество и состав радиации, проникающей на земную поверхность, сложным образом зависят от напряженности магнитного поля и его конфигурации. Влияние радиации зависит от расстояния до поверхности Земли и может сводиться к различным эффектам, учет которых предполагает дополнительные исследования, например к влиянию на озоновый слой Земли. В данной работе мы не затрагиваем эти вопросы, а лишь рассматриваем отдельный сценарий развития инверсии магнитного поля, при котором, кроме дипольного магнитного поля, происходит ослабление и поля более высоких гармоник.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идея затухания магнитного поля во время инверсии рассматривалась еще при анализе наблюдений отдельных инверсий [19] и далее была использована в моделях среднего поля [20] для объяснения временной асимметрии магнитного момента во время инверсии. С точки зрения моделирования экскурсы и инверсии являются близкими явлениями. К этому заключению можно прийти, наблюдая появление экскурсов и инверсий в трехмерных моделях геодинамо. При последовательном увеличении интенсивности конвекции сначала появляется стационарное дипольное магнитное поле, а затем уже появляются флуктуации как мелкомасштабного поля, так и дипольного. Амплитуда этих флук-

туаций растет с увеличением интенсивности конвекции. В конце концов амплитуда диполя может временами снижаться в несколько раз. Последнее интерпретируется как экскурс магнитного поля. Поскольку флуктуирует еще и недипольное магнитное поле, то, в силу недостаточного пространственного разрешения наблюдений, поведение магнитного поля во время экскурса может зависеть от точки наблюдения. С этим связаны дискуссии о возможной локальности экскурса.

Дальнейшее увеличение амплитуды флуктуации приводит к появлению инверсий. Поскольку уравнения динамо симметричны относительно смены знака всего магнитного поля $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{B}$, то следует ожидать инверсию магнитного поля на всех масштабах. Это утверждение, вообще говоря, не является строгим. Но оно подкрепляется тем эмпирическим фактом из моделирования, что инверсии магнитного поля не приводят к изменению течений. Последнего условия оказывается уже достаточно, чтобы магнитное поле меняло знак на всех масштабах.

Поскольку в настоящее время нет точного понимания, насколько велики числа Рэлея в ядре Земли, оценки напряженности недипольного магнитного поля во время инверсий и экскурсов, полученных из палеомагнитных наблюдений, могут быть весьма полезными для оценки Ra . В случае если напряженность недипольного магнитного поля также будет снижаться во время инверсий, то можно ожидать, что Ra находится вблизи своего критического значения, а инверсии связаны с затуханием всего магнитного поля.

Маловероятно, что на протяжении нескольких миллиардов лет существования магнитного поля Земли интенсивность источников энергии динамо и, как следствие, соотношение дипольной и недипольной компонент магнитного поля оставались неизменными. Соответственно и влияние инверсий и их частоты на живые организмы на Земле также могло меняться.

Часть работы, посвященная моделированию процессов динамо, была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-17-00112. Анализ палеомагнитных данных был выполнен в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

[1] Каулинг Т.К. Магнитная гидродинамика. М.: Изд-во иностр. лит., 1984.
 [2] Roberts P.H., King E.M. // *Rep. Prog. Phys.* **76**, N 9. 096801 (2013).
 [3] Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986.
 [4] Valet J.-P. // *Rev. Geophys.* **41**, N 1. 4. (2003).
 [5] Ogg J.G. Geomagnetic polarity time scale in Geologic Time Scale. Eds. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Elsevier, 2020. pp. 159–192.
 [6] Wicht J. // *Phys. Earth Planet. Inter.* **132**, N 4. 281. (2002).
 [7] Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинами-

ка средних полей и теория динамо. М.: Мир, 1984.
 [8] Решетняк М.Ю. // *Физика Земли.* № 4. 93. (2017).
 [9] Christensen U., Olson P., Glatzmaier G.A. // *Geophys. J. Int.* **138**, N 2. 393. (1999).
 [10] Christensen U.R., Aubert J. // *Geophys. J. Int.* **166**, N 1. 97. (2006).
 [11] Решетняк М.Ю. // *Геомагнетизм и Аэрономия.* **61**, № 2. 267. (2021). (Reshetnyak M.Y. // *Geomagn. Aeron.* **61**, 266 (2021)).
 [12] Christensen U.R., Aubert J., Hulot G. // *Earth Planet. Sci. Lett.* **296**, N 3–4. 487. (2010).
 [13] Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **A58**. 957. (2000).

- [14] Jones C.A., Roberts P.-H. // *J. Fluid Mech.* **404**. 311. (2000).
- [15] Царева О.О., Зелёный Л.М., Малова Х.В. и др. // *УФН*. **188**, N 2. 207. (2018). (O. O. Tsareva, L. M. Zelenyi, H. V. Malova et al. // *Phys.-Usp.* **61** 191 (2018)).
- [16] Решетняк М.Ю. // *Геомагнетизм и аэрономия*. **60**, № 1. 126. (2020). (M. Yu. Reshetnyak // *Geomagn. Aeron.* **60**, 121 (2020).)
- [17] Licht A., Hulot G., Gallet Y., Thébaud E. // *Phys. Earth Planet. Int.* **224**. 38. (2013).
- [18] A. Tangborn, W. Kuang // *Phys. Earth Planet. Int.* **276**. 2. (2018).
- [19] Valet J.-P., Meynadier L., Guyodo Y. // *Nature*. **435**, N 7043. 802. (2005).
- [20] Решетняк М.Ю. // *Астрономический вестник*. **53**, № 4. 265. (2019).

Behavior of the geomagnetic field during reversals and excursions

M.Yu. Reshetnyak

¹*Institute of the Physics of the Earth RAS. Moscow 123995, Russia*

²*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS
Troitsk, Moscow, 108840 Russia
E-mail: m.reshetnyak@gmail.com*

On the basis of the three-dimensional geodynamo model, it is shown that at small amplitudes of heat sources during reversals and excursions of the geomagnetic field, attenuation of not only the dipole magnetic field, but also the field of high harmonics is observed. In this scenario, the Earth's magnetosphere may be significantly smaller than previously expected, and the amount of radiation penetrating the Earth may be correspondingly greater. On the basis of the three-dimensional geodynamo model, it is shown that at small amplitudes of heat sources during reversals and excursions of the geomagnetic field, attenuation of not only the dipole magnetic field, but also the field of high harmonics is observed. In this scenario, the Earth's magnetosphere may be significantly smaller than previously expected, and the amount of radiation penetrating the Earth may be correspondingly greater.

PACS: 47.65.Md.

Keywords: paleomagnetism, magnetosphere, dynamo, reversals.

Received 30 November 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 1. Pp. 107–112.

Сведения об авторе

Решетняк Максим Юрьевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, гл. науч. сотрудник;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com.