

СИНХРОННОСТЬ ДИПОЛЯ И КВАДРУПОЛЯ ВО ВРЕМЯ ИНВЕРСИЙ И ЭКСКУРСОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. М. Ю. Решетняк^{1,2}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

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

Поступила в редакцию 28.04.2023

После доработки 05.07.2023

Принята к публикации 08.07.2023

В отличие от инверсий, экскурсы геомагнитного поля могут происходить при меньшей интенсивности конвекции в ядре Земли. Поскольку для таких режимов динамо поведение магнитного поля еще квазирегулярно, уменьшение дипольного поля во время экскурса может свидетельствовать о глобальном сбое процесса динамо. Как следствие, во время экскурса возможно уменьшение не только дипольной компоненты, но и полей более высоких гармоник. Эта гипотеза тестируется в рамках трехмерной модели динамо.

Ключевые слова: геомагнетизм, динамо, экскурсы, инверсии.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724010016>, **EDN:** EOCWHD

ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле Земли, генерируемое в жидком ядре, на поверхности планеты с точностью до 90% представляет собой диполь [Valet, 2003]. На поверхности ядра относительная амплитуда дипольной компоненты становится немногим больше квадрупольной гармоники. На временах миллион лет и более магнитный диполь менял свою полярность. Смены полярности, именуемые инверсиями геомагнитного поля, происходили случайно. Характерное время инверсии составляло несколько десятков тысяч лет. В настоящее время по палеомагнитным данным насчитывается более пятисот инверсий, последняя из которых произошла 780 тыс. лет назад [Ogg, 2020]. Длительность интервалов постоянной полярности магнитного диполя колеблется от 100 тыс. до десятков миллионов лет. Интерес к инверсиям связан, в том числе, с неопределенностью оценок влияния радиации на биоту, усиливающемуся во время ослабления магнитного поля. Изучение редких инверсий тесно связано с поведением магнитного поля во время суперхронов магнитного поля, когда полярность диполя не менялась в течение десятков миллионов лет.

Помимо инверсий магнитного поля в палеомагнитных записях наблюдаются так называемые экскурсы магнитного поля, во время которых дипольная компонента магнитного поля, так же как и при инверсии, уменьшалась в несколько раз, но затем возвращалась в прежнее состояние, не меняя знак. Время таких скачков было в несколько раз меньше времени инверсии. Экскурсы иногда называют несостоявшимися инверсиями [Gubbins, 1999; Zhang, Gubbins, 2000]. Насколько эти два явления близки с физической точки зрения пока неясно.

Для изучения тонкой структуры инверсий и экскурсов крайне полезны результаты численного моделирования [Glatzmaier, 2013]. В целом, современные трехмерные модели геодинамо успешно воспроизводят инверсии и экскурсы геомагнитного поля. Источником энергии в таких моделях служит тепловая и/или композиционная конвекции, степень интенсивности которых определяется соответствующими числами Рэлея—Ra (см. подробнее определение Ra для тепловой конвекции в Приложении). Увеличение Ra сначала приводит к появлению как таковой конвекции,

и далее — к появлению дипольного магнитного поля без инверсий и экскурсов. Дальнейшее увеличение Ra приводит к хаотизации течения, относительному росту недипольных мод, появлению сначала экскурсов, а потом и инверсий. Рост Ra приводит к относительному уменьшению сил вращения по отношению к силам плавучести, и в конечном счете, к ослаблению генерации крупномасштабного дипольного поля [Christensen, Aubert, 2006]. В результате переход от режима редких инверсий к частым в моделях часто сопровождается потерей дипольности магнитного поля, хотя бы на поверхности жидкого ядра [Решетняк, 2021]. Подобное поведение магнитного диполя прослеживается и в моделях среднего поля, в которых мерой интенсивности источников энергии выступает динамо-число [Решетняк, 2017]. В ранних моделях среднего поля длительность инверсий контролировалась проводимостью твердого ядра, которое запрещало инверсии чаще нескольких тысяч лет [Hollerbach, Jones, 1993]. В трехмерных моделях, в которых магнитное поле, проникающее в твердое ядро, имело меньший масштаб, влияние твердого ядра на частоту инверсий фактически было сведено к нулю [Wicht, 2002].

Следуя изложенному выше сценарию, можно предположить, что степень коррелированности дипольной моды с более высокими модами с ростом Ra , будет в целом, уменьшаться. С другой стороны, это не означает, что в момент смены знака дипольной моды не будет происходить и уменьшения амплитуд более высоких мод. Последнее требует проверки. В этом случае при условии, если все-таки магнитное поле важно для существования жизни на Земле, последствия экскурса окажутся не менее важными, чем инверсии. Ниже рассмотрены результаты трехмерного численного моделирования, позволяющие изучить тонкую структуру вариаций магнитного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования была использована известная трехмерная модель динамо Magic [Wicht, 2002] (см. подробнее Приложение). Конвекция поддерживается разностью температур между границами жидкого ядра с твердым ядром и мантией. Было рассмотрено два режима динамо во вращающемся сферическом слое с радиусом внутреннего ядра $r_i = 0.35$ с безразмерными числами Прандтля, магнитного Прандтля

и Экмана $Pr = 1$, $Pm = 20$, $E = 6.5 \cdot 10^{-3}$, и отличающимися величинами чисел Рэлея $Ra = 410^{-5}$ и 510^{-5} , характеризующими разность температур между твердыми границами в ядре. Параметры были подобраны так, чтобы в обоих случаях магнитное поле было дипольным.

В первом случае, с меньшим перепадом температур между границами, наблюдались три кратковременные смены полярности (1, 2, 3), рис. 1а. Поскольку из анализа поведения угла наклона диполя θ относительно географической оси еще нельзя заключить о наличии полноценной инверсии, требуется дополнительная информация о напряженности магнитного поля. Для этой цели удобно использовать первый коэффициент в разложении Гаусса g_1^0 , представляющий собой вклад осесимметричного диполя в магнитное поле на поверхности жидкого ядра. Анализ рис. 1б свидетельствует, что всплески (1, 2, 3) представляют собой не инверсии, а экскурсы, так как полного восстановления напряженности диполя g_1^0 с обратным знаком не происходило. Не следует забывать, что точность определения g_1^0 по палеомагнитным наблюдениям уменьшается вблизи экватора, в связи с этим, палеомагнитологи определяют экскурс как событие, при котором величина g_1^0 уменьшается в 5–10 раз.

Экскурсы (1, 2, 3) сопровождалась увеличением кинетической энергии E_k течений в жидком ядре приблизительно в два раза, рис. 1в. Детальный анализ свидетельствует, что такое увеличение происходило за счет увеличения не осесимметричной части тороидальной компоненты кинетической энергии. Основной вклад в такие течения вносит вращение вертикальных циклонических вихрей в ядре. Уменьшение полной магнитной энергии E_m (за счет осесимметричной компоненты) во время рассмотренных экскурсов происходило в 6 раз и более, см. рис. 1г. Квадратная осесимметричная компонента g_2^0 уменьшалась также, как и g_1^0 , рис. 1д. Последнее означает, что во время экскурсов (1, 2, 3) радиус магнитосферы Земли будет существенно меньше, ее конфигурация будет иметь более сложную структуру, в силу мультиполярности магнитного поля, а поток проникающей радиации возрастет.

На протяжении экскурсов наблюдалось увеличение гидродинамической спиральности $\chi = \text{rot} \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}$, где $\mathbf{V}$ — скорость течения, в 1.5–2 раза синхронно в двух полушариях. Согласно теории динамо средних полей [Краузе, Рэдлер, 1984], χ тесно связан с α -эффектом,

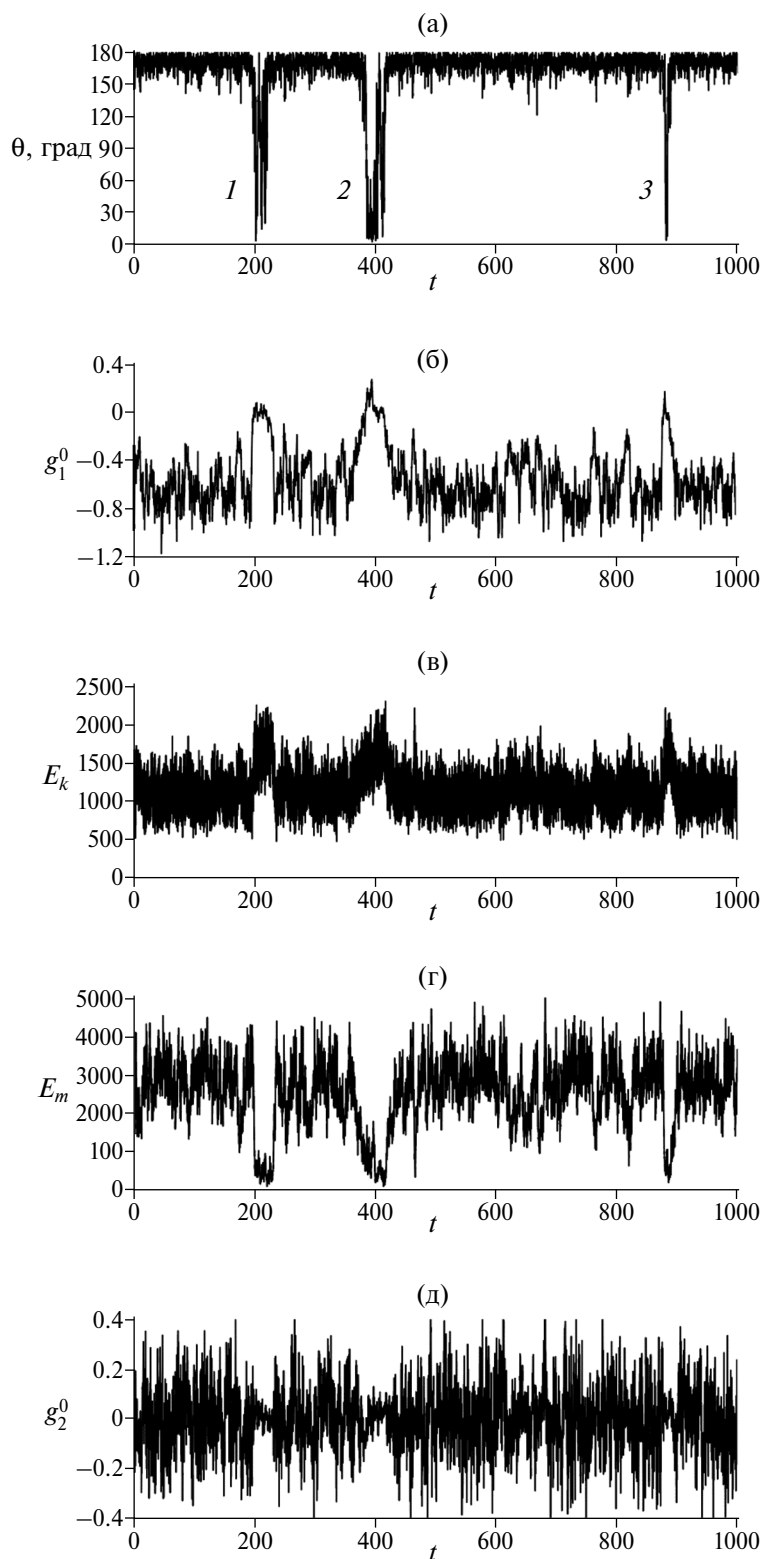


Рис. 1. Зависимость от времени t угла отклонения θ осевого диполя от географической оси (а), амплитуды осевого диполя g_1^0 (б), кинетической E_k (в) и магнитной E_m (г) энергий, и осесимметричного квадруполь g_2^0 (д) для $Ra = 4 \cdot 10^{-5}$. Цифрами отмечены наиболее яркие экскурсы.

ответственным за генерацию крупномасштабного магнитного поля. Является ли увеличение χ причиной экскурса или отражением того факта, что кинетическая энергия E_k также возрастает, сказать сложно. В любом случае можно заключить, что в случае повышения кинетической энергии энергетически выгодно состояние с меньшей магнитной энергией E_m , и наоборот — повышение E_m приводит за счет обратного воздействия магнитного поля на течения, к ослаблению конвекции. Численные эксперименты с фиксированными распределениями α - и ω -эффектов в двумерных моделях динамо среднего поля [Решетняк, 2017] скорее свидетельствуют, что крупномасштабное магнитное поле существует в некотором диапазоне амплитуд этих эффектов. Ограничение на генерацию крупномасштабного магнитного поля при слишком больших значениях источников энергии имеет простое объяснение. Обычно, в моделях используются простые формы обратного воздействия магнитного поля на α -эффект, сводящиеся к его подавлению. В этом случае быстро растущие мелкомасштабные магнитные поля настолько искажают пространственное распределение α -эффекта, делая его мелкомасштабным, что генерация крупномасштабного магнитного поля становится невозможной.

В трехмерных вычислениях анализ становится более сложным, поскольку необходимо дополнительно учитывать возрастание турбулентной вязкости. Но в целом картина остается такой же: дипольное магнитное поле генерируется в некотором диапазоне чисел Рэлея, характеризующих интенсивность тепловой конвекции [Christensen, Aubert, 2006].

Суммируя, заключаем, что в момент экскурса происходит кратковременный сбой динамо-механизма, приводящий к уменьшению не только дипольного магнитного поля, но и квадрупольного. Уменьшение магнитной энергии во всем жидком ядре не компенсируется аналогичным увеличением кинетической энергии, а значит, в силу законов сохранения энергии, приводит к повышенной омической диссипации в ядре, например, за счет увеличения турбулентной вязкости. Обратим внимание, что столь экстремальное поведение магнитного поля во время экскурсов можно интерпретировать и с оптимистической точки зрения: поскольку экскурсов в прошлом было намного больше, чем инверсий, влияние уменьшения дипольной компоненты на биологические организмы может быть не столь велико, как иногда предполагают.

Случай с более развитой конвекцией представлен на рис. 2. Наблюдается большее число смен полярности, рис. 2а, соответствующих как экскурсам магнитного поля, во время которых магнитный диполь лишь ненадолго находился в экваториальной зоне, так и полноценным инверсиям, когда амплитуда g_1^0 успевала восстановиться после смены полярности. Наиболее яркие инверсии отмечены цифрами. Так же, как и для экскурсов, наблюдается антикорреляция между поведением магнитной и кинетической энергий, но в меньшей степени. Если ранее поведение E_m и g_1^0 были близки, то теперь E_m стало более зашумленным, в силу наличия большего количества возбужденных мод. Перед инверсиями наблюдается увеличение амплитуды магнитного диполя. В свою очередь, небольшие скачки g_1^0 приводят к колебаниям либо вблизи географических полюсов, либо к экскурсам.

Чтобы оценить степень коррелированности дипольной и квадрупольной компонент, рассмотрим инверсии изображенные на рис. 2 в удобном масштабе, см. рис. 3. Поскольку характерные времена компонент отличаются в несколько раз (дипольная изменяется медленнее) [Christensen, Tilgner, 2004], инверсии можно разделить на 2 фазы: некоррелированное поведение g_1^0 и g_2^0 до и после инверсии, и непродолжительный период, когда обе компоненты имеют маленькую амплитуду. Последнее напоминает ситуацию с экскурсом выше, во время которого дипольная и квадрупольная компоненты уменьшились в несколько раз одновременно. Другими словами, согласно рассмотренной модели можно ожидать, что и во время инверсии существует временной период, когда количество попавшей радиации увеличивается за счет одновременного уменьшения дипольного и квадрупольного полей. Длительность такого периода в несколько раз меньше длительности инверсий, которые длятся несколько десятков тысяч лет. По порядку величины длительность второй фазы сравнима с продолжительностью экскурсов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Представленный выше сценарий появления сначала экскурсов, а потом и инверсий магнитного поля приводит к мысли, что инверсии и экскурсы имеют много общего, хотя и различаются по длительности. По мере увеличения интенсивности конвекции, характерные времена течений и вариаций геомагнитного

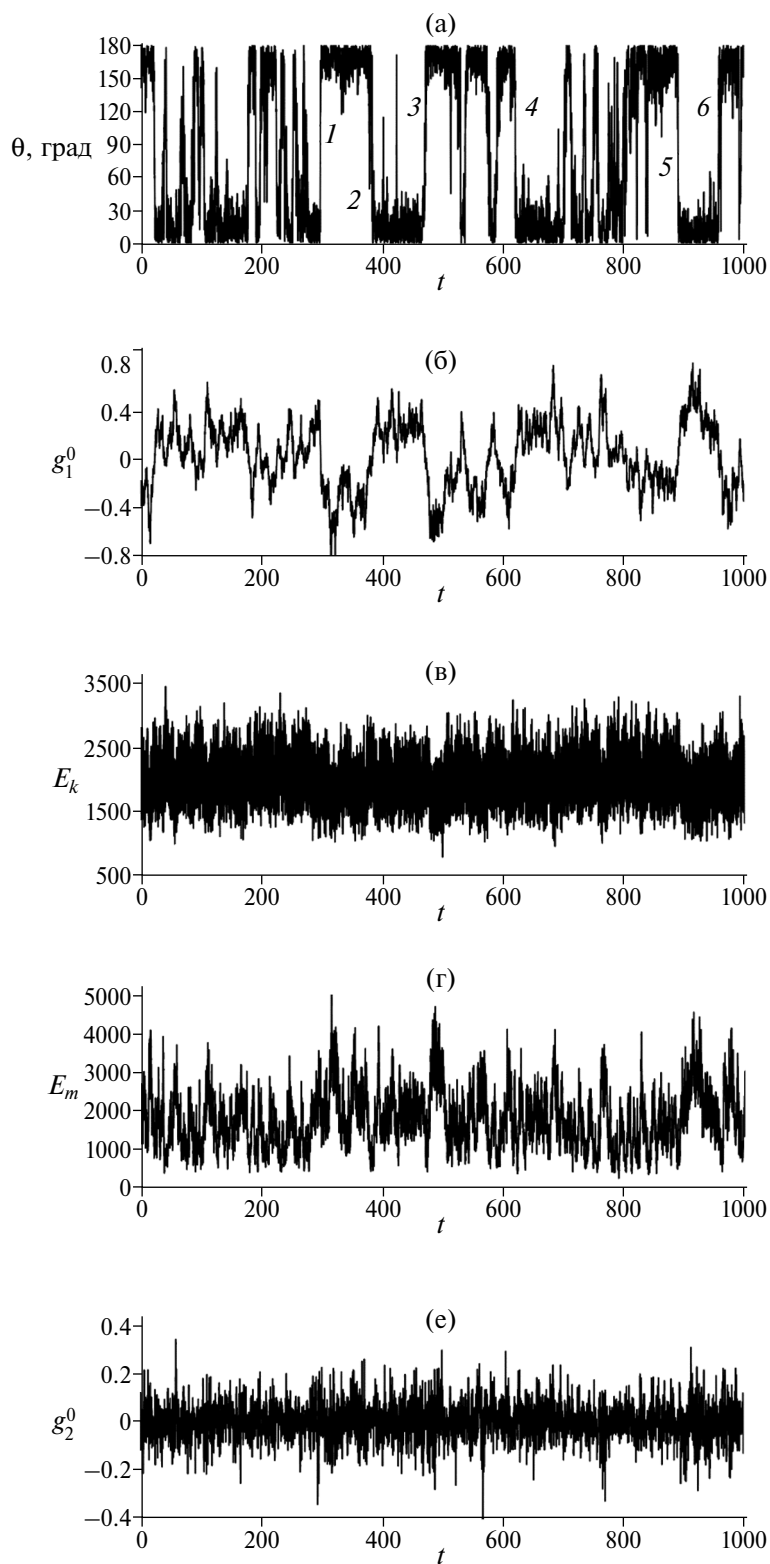


Рис. 2. Зависимость от времени t угла отклонения θ осевого диполя от географической оси (а), амплитуды осевого диполя g_1^0 (б), кинетической E_k (в) и магнитной E_m (г) энергий, и осесимметричного квадруполь g_2^0 (д) для $Ra = 5 \cdot 10^{-5}$. Цифрами отмечены наиболее яркие инверсии.

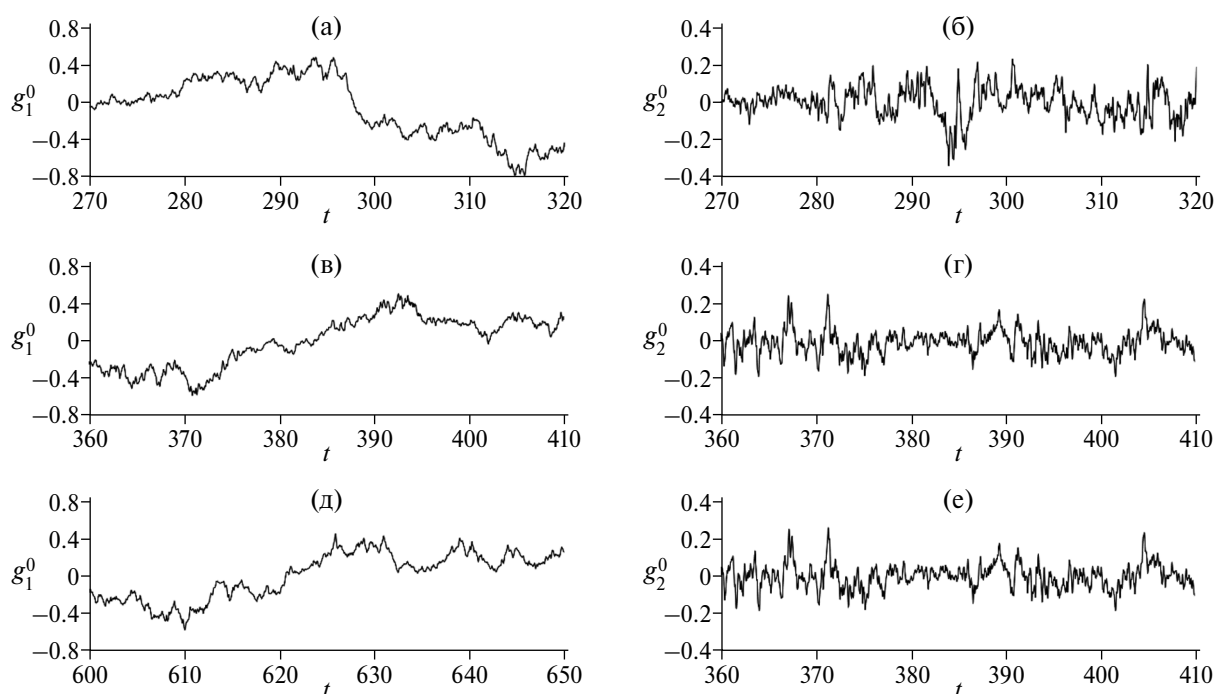


Рис. 3. Зависимость от времени t осевого диполя g_1^0 (а), (в), (д) и квадруполья g_2^0 (б), (г), (е) во время инверсий (1, 2, 3) на рис. 2 в увеличенном масштабе соответственно.

поля уменьшаются, а их амплитуда увеличивается. Поскольку наблюдаемые в трехмерных вычислениях спектры кинетической энергии и магнитного поля непрерывны, и, как правило, монотонно убывающие, мы вправе ожидать, что с ростом интенсивности конвекции корреляция между разными модами в спектре Гаусса будет все меньше. Такое предположение принимается для мод с $l > 1$ для современного поля, где l – номер гармоники в ряде Гаусса [Hulot, Mouël, 1994]. В принципе, при больших Ra , это свойство могло бы выполняться и для $l \geq 1$, поскольку дипольное магнитное поле ничем принципиально не отличается от более высоких гармоник, во всяком случае в зоне генерации. На практике это утверждение сложно проверить в силу недостаточности точности наблюдений. Повышенный интерес к поведению дипольного магнитного поля обусловлен исключительно более быстрым убыванием старших членов ряда с удалением от границы ядро–мантия. Нетривиальным оказывается, что в момент экскурса и быстрой фазы инверсии происходит синхронизация первых двух гармоник. Поскольку характерное время квадрупольного поля τ_q меньше дипольного τ_d , и длительность интервала времени в течение которого амплитуда квадрупольного поля

мала, много больше τ_q , говорить о случайном совпадении уменьшения амплитуд дипольного и квадрупольного полей не приходится. Это означает, что существует некоторый механизм, согласно которому происходит синхронизация компонент. Вопрос, насколько этот результат зависит от выбора параметров, которые не всегда удается взять соответствующими земным условиям, остается открытым.

Полученные результаты важны для предсказания поведения магнитного поля при переходе от суперхрона к режиму частых инверсий и обратно. Этот момент времени соответствует минимальному значению кинетической энергии, при котором возможна инверсия, и соответственно, может происходить одновременное уменьшение не только дипольного магнитного поля, но и поля более высоких мод. Это состояние отличается от режима частых инверсий, когда степень коррелированности диполя и более высоких мод будет меньше.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Часть работы, посвященная экскурсам, выполнена в рамках Госзадания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. Изучение тонкой структуры инверсий выполнена при поддержке фонда РФФИ, грант 23-17-00112.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Рассмотрим уравнения динамо в сферическом слое $r_i \leq r \leq r_0$, где (r, θ, φ) – сферическая система координат, $r_0 = 1$, $r_i = 0.35$. Вводя следующие единицы измерения для скорости $\mathbf{V}$, времени t , давления P и магнитного поля $\mathbf{B}$: v/d , d^2/v , $\rho v^2/d^2$ и $\sqrt{2\Omega\rho v\mu}$, где $d = r_0 - r_i$ – единица длины; v – коэффициент кинематической вязкости; ρ – плотность вещества; μ – магнитная проницаемость, запишем систему уравнений динамо в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \text{Pm}^{-1} \Delta \mathbf{B}, \quad \nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} &= -\nabla P - \frac{2}{E} \mathbf{1}_z \times \mathbf{V} + \\ &+ \frac{\text{Ra}}{\text{Pr}} T \frac{\mathbf{r}}{r_0} + \Delta \mathbf{V} + \frac{1}{E \text{Pm}} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) (T + T_0) &= \text{Pr}^{-1} \Delta T. \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

Безразмерные числа Прандтля, Экмана, Рэлея и магнитного Прандтля заданы в виде: $\text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa}$, $E = \frac{\nu}{\Omega L^2}$, $\text{Ra} = \frac{\alpha g_0 \delta T d^3}{\nu \kappa}$ и $\text{Pm} = \frac{\nu}{\eta}$, где κ – коэффициент молекулярной теплопроводности; α – коэффициент объемного расширения; g_0 – ускорение свободного падения; δT – единица возмущения температуры T относительно “диффузионного” (не конвективного) распределения температуры $T_0 = \frac{r_i(r-1)}{r(r_i-1)}$ η – коэффициент магнитной диффузии. Давление P содержит поправку на центробежную силу.

Система (A.1) замыкается вакуумными граничными условиями для магнитного поля на r_0 , r_i , нулевыми граничными условиями для поля скорости и возмущений температуры. В работе использован псевдоспектральный MPI-код Magic [Wicht, 2002], основанный на представлении векторных физических полей в виде суммы полоидальной и тороидальной компоненты. Далее использовано спектральное разложение Галеркина по 65 полиномам Чебышева в радиальном направлении и 128

сферическим функциям в тангенциальных направлениях. Интегрирование по времени проводилось по схемам второго порядка точности Кранка–Николсона для вязких членов и Адамса–Башфорта для остальных членов. Расчеты проводились под операционной системой Gentoo на 16-ядерных процессорах Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Решетняк М.Ю.* Инверсии геомагнитного поля: ограничение на интенсивность конвекции в ядре Земли? // Геомагнетизм и Аэрономия. 2021. Т. 61. № 2. С. 267–272.
- Решетняк М.Ю.* Адаптация модели среднего поля в геодинамо // Физика Земли. 2017. № 4. С. 93–99.
- Краузе Ф., Рэдлер К.-Х.* Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Мир. 1984.
- Christensen U.R., Tilgner A.* Power requirement of the geodynamo from ohmic losses in numerical and laboratory dynamos // Nature. 2004. V. 429. № 6988. P. 169.
- Christensen U., Aubert J.* Scaling properties of convection-driven dynamos in rotating spherical shells and application to planetary magnetic fields // Geophys. J. Int. 2006. V. 166. P. 97–114.
- Hollerbach R., Jones C.A.* Influence of the Earth’s inner core on reversals // Nature. 1993. V. 365. P. 541–546.
- Glatzmaier G.A.* Introduction to modeling convection in planets and stars: Magnetic field, density stratification, rotation. Princeton University Press. 2013.
- Gubbins D.* The distinction between geomagnetic excursions and reversals // Geophys. J. Int. 1999. V. 137. № 1. P. F1–F3.
- Hulot G., Mouël J.Le.* A statistical approach to the earth’s main magnetic field // Phys. Earth Planet. Int. 1994. V. 82. № 3–4. P. 167–183.
- Ogg J.* Geomagnetic polarity time scale. Elsevier. 2020.
- Valet J.-P.* Time variations in geomagnetic intensity // Rev. Geophys. 2003. V. 41. № 1. P. 4.
- Wicht J.* Inner-core conductivity in numerical dynamo simulations // Phys. Earth Planet. Int. 2002. V. 132. № 4. P. 281–302.
- Zhang K., Gubbins D.* Is the geodynamo process intrinsically unstable? // Geophys. J. Int. 2000. V. 140. № 1. P. F1–F4.

Synchrony between Dipole and Quadrupole During Magnetic Field Reversals and Excursions

M. Yu. Reshetnyak^{a,b,*}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

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

Received April 28, 2023

revised July 5, 2023

accepted July 8, 2023

Abstract — In contrast to reversals, excursions of the geomagnetic field can occur at lower convection intensities in the Earth's core. Since in such geodynamo regimes the behavior of the magnetic field is still quasi regular, a reduction of the dipole field during an excursion may indicate a global failure of the dynamo process. As a consequence, it is possible that during the excursion, not only the dipole component, but also the higher harmonics of the field decrease. This hypothesis is tested in a three-dimensional (3D) dynamo model.

Keywords: geomagnetism, dynamo, excursions, reversals