

УДК 550.383

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛЯХ ГЕОДИНАМО

© 2025 г. М. Ю. Решетняк

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

E-mail: m.reshetnyak@gmail.com

Поступила в редакцию 01.05.2024 г.

После доработки 22.07.2024 г.

Принята к публикации 07.08.2024 г.

Увеличение интенсивности тепловых источников в ядре Земли приводит к уменьшению напряженности дипольного магнитного поля. Пространственный спектр магнитного поля становится мультипольным. Интенсивность вариаций магнитного диполя и его отклонений от оси вращения возрастает. Зависимость длительности магнитозон постоянной полярности зависит по степенному закону от амплитуды магнитного диполя. Показатель степенной функции может меняться в зависимости от амплитуды диполя в два раза. Суперхроны магнитного поля соответствуют высокой напряженности магнитного диполя.

Ключевые слова: геомагнетизм, динамо, экскурсы, инверсии.

DOI: 10.31857/S0002333725030019, **EDN:** FEWHJC

ВВЕДЕНИЕ

Магнитное поле Земли генерируется течениями проводящей среды в ядре Земли. Если тридцать лет назад перед исследователями стоял вопрос о принципиальной возможности генерации магнитного поля течениями, возникающими в моделях тепловой или композиционной конвекции, то в настоящее время акцент сместился в сторону генерации поля с максимально близкими к наблюдаемым геомагнитологами чертами [Wicht, Sanchez, 2019]. Принципиальная сложность моделирования состоит в том, что модели геодинамо включают в себя кроме магнитного поля еще несколько физических полей: тепловое, гравитационное, которые не наблюдаются на поверхности Земли. Более того, и само магнитное поле известно нам на поверхности Земли лишь частично: на поверхность планеты проникает лишь полоидальная компонента магнитного поля с поверхности жидкого ядра, то-

роидальная же компонента остается невидимой. Поэтому совсем неудивительно, что, задавшись целью воспроизвести лишь одну черту геомагнитного поля, например, частоту инверсий или пространственный спектр магнитного поля, находится целый набор моделей с принципиально разными механизмами конвекции, граничными условиями, скоростью роста твердого ядра и т.д. Для того чтобы сузить диапазон моделей, требуется использование целого ряда характеристик магнитного поля одновременно [Christensen et al., 2010]. Сами критерии выбора также могут меняться со временем: если современные измерения дают детальную пространственную структуру магнитного поля, то измерениям древнего магнитного поля доступно лишь поведение магнитного диполя. Насколько возможна стыковка этих двух подходов при условии, что ядро, как и вся планета, эволюционировало, остается открытым вопросом.

Ниже рассмотрено, какие ограничения на выбор модели геодинамо вносят вариации геомагнитного поля, в частности магнитного диполя на основе трехмерной модели геодинамо Magic [Wicht, 2002]. Анализ включает в себя как вариации напряженности магнитного поля, так и вариации магнитного диполя относительно оси вращения, а также связь напряженности магнитного поля и длительности магнитозон постоянной полярности.

ИНВЕРСИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛЯХ

Смена полярности магнитного поля наблюдается не только в земном динамо, но также и в звездах. Если в звездах, в том числе и на Солнце, это процесс периодический, смена полярности геомагнитного диполя — процесс случайный [Зельдович и др., 1988]. Диапазон длительностей магнитозон постоянной полярности находится в диапазоне 10^5 – 10^7 лет. Охватить такой диапазон времен в сложных моделях динамо достаточно трудно, поскольку даже минимальный временной масштаб в этом диапазоне еще много больше характерного времени конвекции, связанного с суточным вращением, и который также нужно разрешить в модели. Еще одной важной чертой геодинамо является существование аттрактора: магнитный полюс большую часть времени находится вблизи географического полюса, а затем сравнительно быстро переходит в другое полушарие, в результате чего магнитный диполь меняет свою полярность. Это принципиально отличается от гармонических колебаний магнитного поля на Солнце. Такое поведение геомагнитного диполя удастся воспроизводить в моделях геодинамо, различных по степени сложности.

В моделях среднего поля [Краузе, Рэдлер, 1984] с заданными гидродинамическими параметрами инверсии появляются в двух случаях [Решетняк, 2017]. В первом случае инверсии происходят вблизи порога генерации магнитного поля за счет искусственного включения турбулентной флуктуации, приводящей к уменьшению энергии источников конвекции. Инверсия сопровождается затуханием всего магнитного поля. Использование случайных флуктуаций в моделях оказывается весьма полезным: они позволяют не только получить случайную сме-

ну полярности, но и сохранить преобладание магнитного диполя над старшими гармониками между инверсиями. Во втором случае, при достаточно интенсивной конвекции, инверсии возникают самопроизвольно, но одновременно, магнитное поле перестает быть дипольным даже между инверсиями.

В трехмерных моделях динамо, включающих в себя уравнения гидродинамики и теплопереноса, случайные флуктуации возникают также самопроизвольно при больших числах Рейнольдса (см. подробнее в работе [Решетняк, 2021]). Попытки принудительного кратковременного уменьшения скачка температур на границах жидкого ядра приводят к затуханию всего магнитного поля, но смены полярности при этом не происходит. Наиболее вероятной причиной возникновения инверсий в трехмерных моделях является увеличение турбулентных флуктуаций в ядре до такой степени, что смена полярности дипольной моды, обладающей наибольшей энергией, становится возможной.

Причина различия в поведении трехмерных моделей геодинамо и моделей среднего поля связана с различным влиянием магнитного поля на конвекцию. В моделях среднего поля простейшей формой нелинейности является подавление источников конвекции введением нелинейности $\sim \frac{1}{1+B^2}$. В то же время анализ трехмерных уравнений тепловой конвекции при быстром вращении демонстрирует резкое подавление турбулентности магнитным полем, что в свою очередь приводит к уменьшению диссипации в системе и уменьшению критического числа Рэлея на несколько порядков [Chandrasekhar, 1970; Rüdiger et al., 2013]. В моделях среднего поля такой сценарий, как правило, не рассматривался.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Тепловая конвекция в модели Magic во вращающемся сферическом слое поддерживается разностью температур на границах слоя. Аналогом скачка температур в уравнениях динамо, записанных в безразмерном виде, является число Рэлея (см. подробнее в работе [Wicht, 2002]). В работе был рассмотрен ряд расчетов с числами Прандтля $Pr = 1$, магнитного Прандтля $Pm = 20$,

Экмана $E = 6.5 \cdot 10^{-3}$ и Рэлея в диапазоне $Ra = (3 - 6)10^4$ с шагом $5 \cdot 10^3$. Данный диапазон Ra включает переход от режима без инверсий магнитного поля к режиму с инверсиями [Christensen, Aubert, 2006; Решетняк, 2021], находящемуся в районе $Ra = 3.510^4$.

На рис. 1 приведены зависимости средних по времени напряженности осесимметричного магнитного диполя $|g_1^0|$, кинетической $\overline{E_k}$ и магнитной $\overline{E_m}$ энергий от числа Рэлея Ra . Переход от режима квазистационарных колебаний магнитного диполя без инверсий к режиму с инверсиями происходит при увеличении интенсивности тепловых источников, Ra . Переход сопровождается уменьшением напряженности магнитного диполя $|g_1^0|$. На начальном этапе полная магнитная энергия $\overline{E_m}$ поля в ядре немного увеличивается. Далее происходит уменьшение $\overline{E_m}$, с последующей стабилизацией магнитной энергии. В этой области магнитное поле становится мультипольным. Вблизи $Ra = 3.510^4$ происходит изменение баланса сил в ядре: конвекция усиливается, кинетическая энергия $\overline{E_k}$, а вместе с ней и нелинейный член в уравнении Навье—Стокса, квадратичный по скорости, возрастают. Последнее приводит к хаотизации течения, увеличению флуктуаций магнитного поля. Для анализа флуктуаций на рис. 2 приведены среднеквадратические отклонения σ величин, а также среднеквадратические отклонения, нормированные на среднее значение, $\hat{\sigma}$. Увеличение Ra приводит к временному увеличению вариации напряженности магнитного диполя, а далее к ослаблению их абсолютного значения. Поскольку среднее значение

напряженности магнитного диполя также уменьшается, относительное значение вариации остается неизменным.

Вариации кинетической энергии повторяют поведение ее среднего по времени значения с изменением Ra , оставляя относительную вариацию приблизительно той же.

Для вариации магнитной энергии наблюдается максимум в районе $Ra = 4.510^4$. При этом значении магнитный диполь меньше своего максимального значения, соответствующего состоянию без инверсий, на 30%. Можно ожидать, что это соответствует максимальным по амплитуде вариациям недипольного магнитного поля.

Обратим внимание, что инверсии начинаются при небольших значениях $\hat{\sigma}_{|g_l^0|}$. Для сравнения,

современное поведение магнитного диполя без инверсий можно представить в виде колебания $g_l^0 \sim 1 + a \sin t$, $a = 0.5$. Тогда нормированное среднеквадратическое отклонение аппроксимируется зависимостью $\hat{\sigma}_{|g_l^0|} \approx 0.71a$. При $a = 0.5$

величина $\hat{\sigma}_{|g_l^0|} \approx 0.35$, что, согласно рис. 2, соот-

ветствует режиму инверсий. Причина противоречия кроется в существовании резких выбросов магнитного поля, существенно меньших по длительности основного периода геомагнитного поля. В этом случае инверсии появляются при значительно меньших значениях $\hat{\sigma}_{|g_l^0|}$.

Средний угол отклонения магнитного диполя от оси вращения также растет с увеличением Ra ,

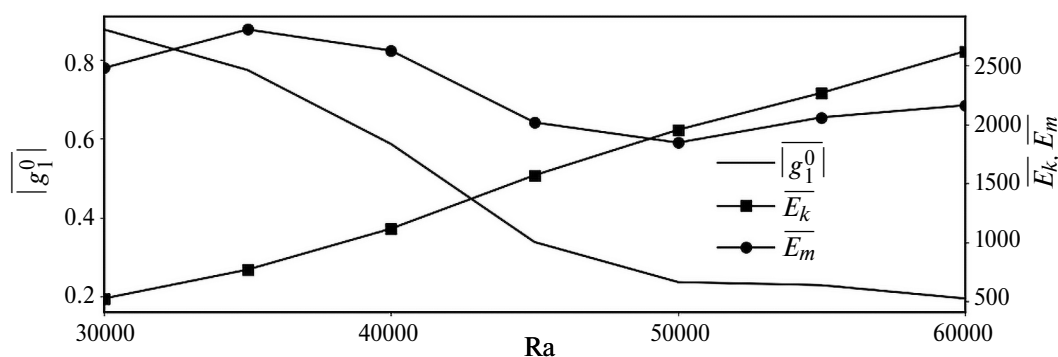


Рис. 1. Зависимость средних по времени амплитуды осесимметричного диполя $|g_1^0|$, кинетической $\overline{E_k}$ и магнитной $\overline{E_m}$ энергий от числа Рэлея в диапазоне $Ra = (3 - 6) \cdot 10^4$ с шагом $5 \cdot 10^3$.

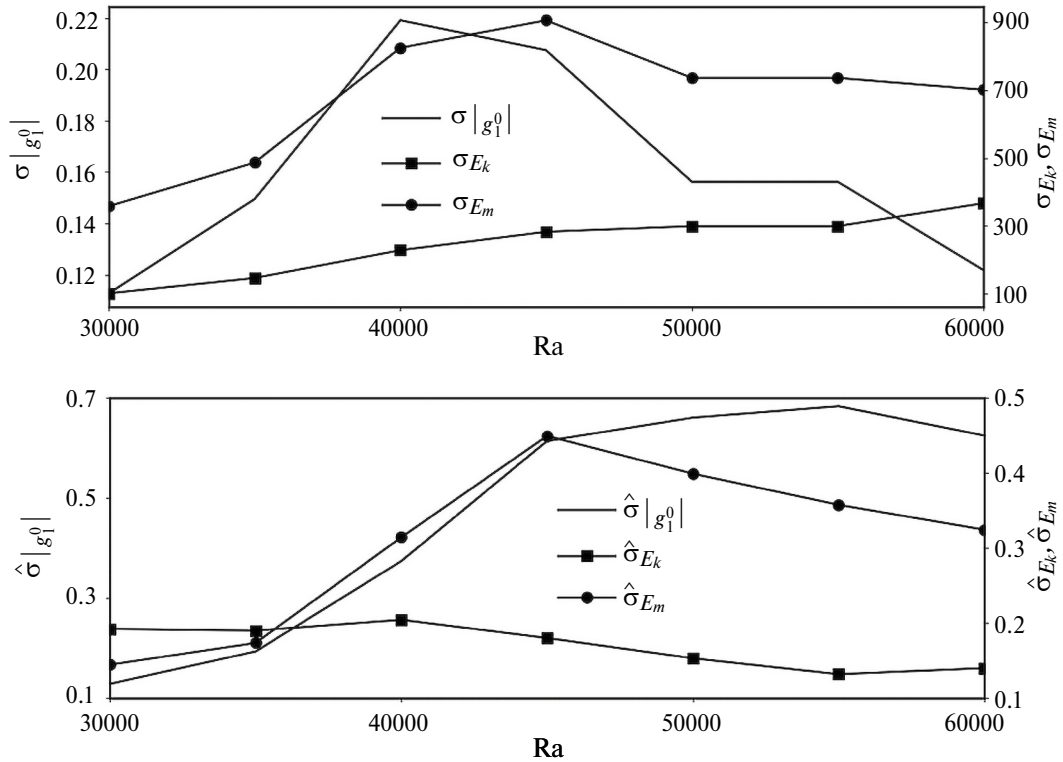


Рис. 2. Зависимость среднеквадратического отклонения осесимметричного диполя $\sigma_{|g_1^0|}$, кинетической σ_{E_k} и магнитной σ_{E_m} энергий от числа Рэлея (верхний рисунок) и нормированных на среднее значение среднеквадратических отклонений осесимметричного диполя $\hat{\sigma}_{|g_1^0|}$ от оси вращения, кинетической $\hat{\sigma}_{E_k}$ и магнитной $\hat{\sigma}_{E_m}$ энергий от числа Рэлея (нижний рисунок).

см. рис. 3. Переменная $\tilde{\theta}$ определена следующим образом: $\tilde{\theta} = \theta$, где

$$\theta = \frac{180}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 + (g_1^0)^2}} \right) < 90^\circ,$$

и $\tilde{\theta} = 180^\circ - \theta$, если $\theta > 90^\circ$. Здесь g_i^m , h_i^m — коэффициенты Гаусса (см., например, работу [Паркинсон, 1986]). Поведение $\sigma_{\tilde{\theta}}$ повторяет поведение $\tilde{\theta}$. Поскольку $\sigma_{\tilde{\theta}} < \tilde{\theta}$, состояние, при которых колебания диполя проходят вдали от географического полюса, в модели не наблюдается. Для сравнения, согласно модели GGF100k [Panovska et al., 2018], средние значения $\sigma_{|g_1^0|}$, $\tilde{\theta}$, $\sigma_{\tilde{\theta}}$ за последние 100 тыс лет составляют: 0.18, 5 и 4° , соответственно. По порядку величины эти значения близки к модельным без инверсий.

Согласно рис. 1, следует ожидать, что существует корреляция между напряженностью магнитного диполя и частотой инверсий: более

высокой напряженности соответствует меньшая частота инверсий и наоборот. Поскольку разделение на экскурсы и инверсии связано с введением некоторого характерного времени, и в силу этого, весьма условно, далее мы будем рассматривать любые, даже незначительные по продолжительности смены полярности, относящиеся как к экскурсам, так и к инверсиям.

Суммируя вычисления для разных Ra , на рис. 4 приведена зависимость длительности магнитозон постоянной полярности τ от напряженности магнитного диполя $|g_1^0|$, средней по τ . Величина τ представлена в единицах безразмерного времени d^2 / ν , где $d \sim 2000$ км — толщина жидкого ядра, а $\nu \sim 1$ м²/сек — турбулентный коэффициент кинематической вязкости. По порядку величины единица времени соответствует 100 тыс. лет. Поскольку значения τ могут быть весьма малы, значения $|g_1^0|$ также могут значительно отличаться от приведенных на рис. 1. Грубая аппроксимация зависимости $\tau(|g_1^0|)$ задается степенной функцией $\tau \sim |g_1^0|^\gamma$ с $\gamma = 1.6$.

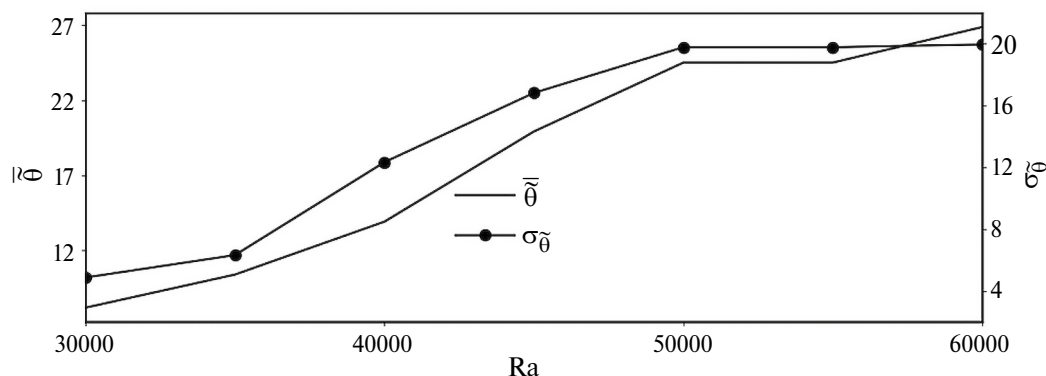


Рис. 3. Зависимость среднего по времени отклонения осесимметричного диполя от оси вращения $\bar{\theta}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{\bar{\theta}}$.

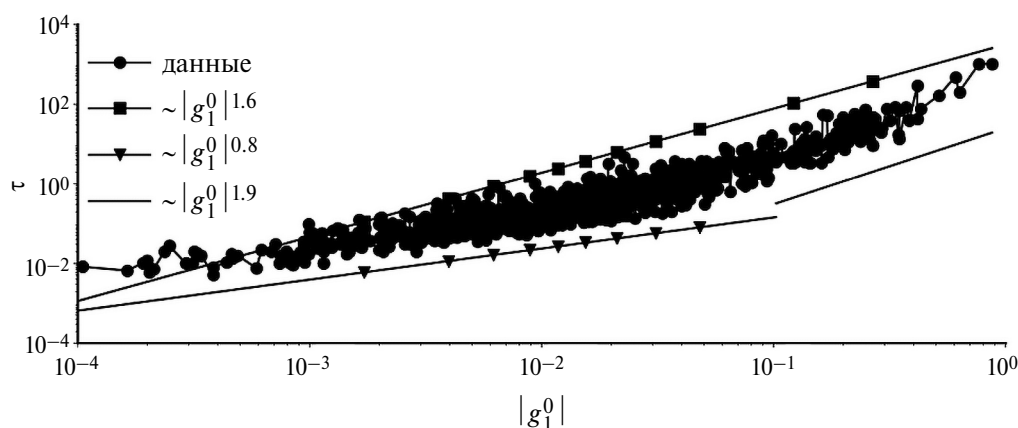


Рис. 4. Зависимость длительности зоны постоянной полярности τ от напряженности осесимметричного диполя $|g_1^0|$. На рисунке также приведены аппроксимации некоторых фрагментов кривой степенными функциями.

Диапазон вариаций охватывает 4 порядка по амплитуде $|g_1^0|$. Это существенно превосходит точность палеомагнитных данных, которая в лучшем случае позволяет ограничиться одним порядком изменения $|g_1^0|$. По длительности магнитозон τ диапазон охватывает 6 порядков, что также превосходит наблюдаемый диапазон вариаций τ от десятков тысяч лет до десятков миллионов. Поскольку магнитное поле оказывает существенное стабилизирующее влияние на конвекцию, может изменять критическое число Рэлея на порядки, возможно существование различных скейлинговых зависимостей $\tau(|g_1^0|)$ для разных $|g_1^0|$. На рис. 4 приведены аппроксимации двух сегментов с границей $|g_1^0| = 0.1$ и с $\gamma = 0.8$ и 1.9 соответственно. Обращаем внимание, что сегмент с меньшими значениями $|g_1^0|$ находится за пределами точности палеомагнитных измерений и имеет предсказательный ха-

рактер. Физически он соответствует флуктуациям $|g_1^0|$ с малой амплитудой, наблюдающимся в моделях динамо. Качественно бимодальное поведение $\tau(|g_1^0|)$ не зависит от интенсивности конвекции и начинает наблюдаться уже при малых Ra .

Согласно рис. 4, суперхроны магнитного поля должны сопровождаться повышенной напряженностью магнитного поля и небольшими вариациями энергий и магнитного диполя.

ОБСУЖДЕНИЕ

Используя несколько характеристик магнитного поля, удастся подобрать режим конвекции в модели и сделать некоторые предсказания о его изменении на основе эволюции геомагнитного поля. Рассмотренные изменения числа Рэлея, менявшегося по величине в два раза, покрывают изменения магнитного поля от случая без инвер-

сий с дипольным магнитным полем до режима частых инверсий с мультипольным магнитным полем. В связи с этим возникает принципиальный вопрос: как столь узкий диапазон вариаций R_a реализовывался на протяжении всей истории геомагнитного поля, насчитывающей более 3.7 млрд лет [Bono et al., 2022]? Возможно ли существование дипольного магнитного поля на протяжении всей истории Земли? Возникающие вопросы крайне актуальны, поскольку температурный режим планеты также эволюционировал, а температура оболочек Земли могла меняться в широком диапазоне [Abe, 1993].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Часть работы, посвященная моделированию процессов динамо, была выполнена при поддержке гранта РНФ 23-17-00112. Анализ палеомагнитных данных был выполнен в рамках Госзадания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. Магнитные поля в астрофизике. М.: Наука. 1988.
- Краузе Ф., Рэдлер К.-Х. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо. М.: Мир. 1984.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986.
- Решетняк М.Ю. Адаптация модели среднего поля в геодинамо // Физика Земли. 2017. № 4. С. 93–99.
- Решетняк М.Ю. Инверсии геомагнитного поля: ограничение на интенсивность конвекции в ядре Земли? // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 2. С. 267–272.
- Abe Y. Physical state of the very early earth // Lithos. 1993. V. 30. № 3–4. P. 223–235.
- Bono R.K., Paterson G.A., Biggin A.J. MCADAM: A continuous paleomagnetic dipole moment model for at least 3.7 billion years // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49. P. 1–10.
- Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Courier Corporation. 1970.
- Christensen U.R., Aubert J. Scaling properties of convection-driven dynamos in rotating spherical shells and application to planetary magnetic fields // Geophys. J. Int. 2006. V. 166. № 1. P. 97–114.
- Christensen U.R., Aubert J., Hulot G. Conditions for earth-like geodynamo models // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 296. № 3–4. P. 487–496.
- Panovska S., Constable C. G., Korte M. Extending global continuous geomagnetic field reconstructions on timescales beyond human civilization // Geoch. Geophys. Geos. 2018. V. 19. P. 4757–4772.
- Rüdiger G., Hollerbach R., Kitchatinov L.L. Magnetic processes in astrophysics: theory, simulations, experiments. John Wiley & Sons. 2013.
- Wicht J. Inner-core conductivity in numerical dynamo simulations // Phys. Earth Planet. Int. 2002. V. 132. № 4. P. 281–302.
- Wicht J., Sanchez S. Advances in geodynamo modelling // Geophys. Astr. Fluid Dyn. 2019. V. 113. P. 2–50.

Magnetic Field Variations in Geodynamo Models

M. Yu. Reshetnyak

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: m.reshetnyak@gmail.com

Received May 01, 2024; revised July 22, 2024; accepted August 07, 2024

Abstract — An increase in the intensity of heat sources in the Earth's core leads to a decrease in the intensity of the dipole magnetic field. The spatial spectrum of the magnetic field becomes multipole. The intensity of variations of the magnetic dipole and its deviations from the rotation axis increases. The dependence of the duration of magnetozones of constant polarity depends on the amplitude of the magnetic dipole according to a power law. The exponent of the power function can change by a factor of two depending on the dipole amplitude. Superchrons of the magnetic field correspond to high intensity of the magnetic dipole.

Keywords: geomagnetism, dynamo, excursions, reversals