

О КОРОТКОПЕРИОДНОЙ ДИНАМИКЕ В ЯДРЕ ЗЕМЛИ ПО НАЗЕМНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ГЕОМАГНИТНЫХ ДЖЕРКОВ

© 2023 г. С. А. Рябова^{1, 2, *}, С. Л. Шалимов¹

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

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 29.08.2022 г.

Принята к публикации 29.08.2022 г.

Применение специальной методики позволило выделить из измерений вариаций геомагнитного поля на нескольких среднеширотных обсерваториях серию джерков за 17 лет с 2004 по 2020 гг. Показано, что джерки следуют с квазипериодом 3–4 года. Для интерпретации этих экспериментальных результатов предложен возможный механизм возникновения быстрых изменений геомагнитного поля, обусловленный магниторотационной неустойчивостью в ядре Земли.

Ключевые слова: геомагнитные джерки, ядро Земли, магниторотационная неустойчивость.

DOI: 10.31857/S0002333723010040, **EDN:** BZPVVG

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные джерки определяют как излом в скорости вековых вариаций (скачок второй производной) одной (как правило, восточной) или нескольких компонент магнитного поля Земли [Адушкин и др., 2021]. Соответственно, в рамках метода математической обработки измерений временных вариаций геомагнитного поля могут применяться различные критерии выделения джерков. Однако, несмотря на различие методик, само существование геомагнитных джерков, исследование которых началось в 50-х годах прошлого столетия [Калинин, 1949; Weber, Roberts, 1951; Walker, O’Dea, 1952], в настоящее время общепризнано [Courtillet, Le Mouel, 1988; Manda et al., 2010; Brown et al., 2013].

Один из самых заметных геомагнитных джерков наблюдался в течение нескольких месяцев 1969–1970 гг. независимо на 130 станциях мира [Le Mouel et al., 1982], причем было установлено внутриземное происхождение джерка [Gire et al., 1984]. Аналогичные события наблюдали в 1901, 1913, 1925, 1978, 1991, 1999, 2003, 2007, 2011, 2014 гг. [Alexandrescu et al., 1995; Macmillan, 1996; Manda et al., 2000; Olsen, Manda, 2008; Olsen et al., 2009; Chulliat, Maus, 2014; Torta et al., 2015]. Джерки, однако, не всегда наблюдаются на всех станциях, а те, которые наблюдают, не всегда одновременны. Например, для джерка 1969 г. показано, что его характерная структура была зарегистрирована в южном полушарии заметно позднее (на 2 года), чем в северном [Alexandrescu et al., 1996].

В настоящее время физические процессы, обуславливающие джерки, включая причины их появления, их повторяемости, пространственное распределение (временные задержки их регистрации на разных станциях) не имеют общепринятого объяснения. Так предполагалось [Bloxham et al., 2002], что джерки могут быть проявлением суперпозиции крутильных колебаний во внешнем ядре Земли, а различия в их регистрации вызваны морфологическими вариациями магнитного поля на границе ядро–мантия (*core-mantle boundary*, СМВ). Предполагалось также [Alexandrescu et al., 1999; Nagao et al., 2003], что временные задержки в наблюдении джерка на разных магнитных станциях обусловлены различиями в проводимости мантии.

С джерками, по-видимому, связано ещё одно немаловажное обстоятельство. Дело в том, что в спектре вариаций угловой скорости вращения мантии Земли (*length of day*, LOD, в английской терминологии) был обнаружен странный пик с амплитудой вариаций до 2 мс вблизи периодов 5–10 лет. Известно, что он не может быть обусловлен движениями в атмосфере или в океане [Abarca del Rio et al., 2000], поскольку такие периоды отсутствуют в спектрах их колебаний, и упомянутая амплитуда – слишком велика для них. В то же время вариации LOD имеют сходство с модельными вариациями LOD, построенными по вековым геомагнитным вариациям, которые обусловлены крупномасштабными течениями в жидком ядре [Jackson, 1997], в предположении, что имеет

место обмен моментом импульса между мантией и МГД течениями в ядре. Эти вариации указывают на существование изменений течений с характерным временем ≤ 10 лет. Такие изменения в жидком ядре ассоциируются с геомагнитными джерками [Jault et al., 1988].

Исследования тонкой структуры указанного достаточно широкого пика в вариациях LOD показали [Duan, Huang, 2020], что он состоит из двух гармоник с периодами 6 и 8.6 лет. Хотя причина этих колебаний до конца не выяснена, но если предполагать, что джерки приурочены к экстремальным величинам амплитуд этих гармоник (на что указывают результаты ряда работ [Шалимов, Ольшанская, 2016; Holme, Vignon, 2005]), то квазипериод повторения джерков должен составлять 3–4 года.

В настоящей работе с использованием измерений вариаций геомагнитного поля на нескольких среднеширотных обсерваториях и с применением специальных методик предпринята попытка выделения серии джерков за 17 лет (точнее, с 2004 по 2020 гг.). Для интерпретации экспериментальных результатов, показавших, что джерки следуют с квазипериодом 3–4 года, предложен механизм возникновения быстрых изменений геомагнитного поля, обусловленный нестабильными процессами в ядре Земли.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе привлекались данные регистрации вариаций геомагнитного поля на обсерватории “Будков” Геофизического института Академии наук Чешской Республики, на Центральной геофизической обсерватории “Бельск” Геофизического института Польской академии наук, на геофизической обсерватории “Борок” Института физики Земли Российской академии наук и обсерватории геомагнетизма Адольфа Шмидта в Немегке. Координаты и месторасположение обсерваторий приведены в таблице.

Регистрация вариаций односекундных значений компонент H , D , B_z геомагнитного поля с разрешением 100 пТ на обсерватории “Будков” выполняется с помощью системы G-DAS с трехосным магнитометром DMI fluxgate.

Регистрация вариаций трех компонент геомагнитного поля на обсерватории “Бельск” выполняется с помощью торсионного кварцевого вариометра системы В.Н. Боброва [Jankowski et al., 1984]. Этот магнитометр имеет хорошую долгосрочную стабильность базисных значений (несколько нТл в год) и разрешение около 0.01 нТл. Температурный коэффициент вариометра составляет 0.2 нТл/К.

С помощью трехосного феррозондового магнитометра IPGP VM391 выполняется регистра-

ция трех компонент геомагнитного поля на обсерватории “Борок”. Трехкомпонентный магнитометр VM391 имеет динамический диапазон $\pm 2 \times 10^4$ нТл, полосу пропускания 0–1 Гц и частоту дискретизации 0.2 Гц.

Регистрация вариаций компонент геомагнитного поля на обсерватории “Немегк” выполняется с помощью системы GEOMAG. Эта система включает трехкомпонентный феррозондовый магнитометр с кольцевым сердечником и протонный магнитометр Оверхаузера. Она состоит из двух датчиков, электронного блока (аналогового электронного, регистратора данных и блока питания) и телеметрии. Регистрация ведется с дискретизацией 1 мин с разрешением 0.1 нТл.

Данные регистрации компонент геомагнитного поля на всех этих обсерваториях размещены на сайте Международной магнитной сети INTERMAGNET [<http://www.intermagnet.org>].

МЕТОДЫ

Определение вековой вариации

При выполнении настоящих исследований с целью проведения сопоставления данные магнитной регистрации приводились к единой географической системе координат (ось X направлена на географический север, Y – на восток, Z – вертикально вниз) и к всемирному координированному времени [Адушкин и др., 2021].

По ежеминутным данным регистрации составляющих геомагнитного поля вычислялись среднемесячные значения как среднее значение на выбранном интервале. Первая производная по времени геомагнитного поля, т.е. вековой вариации (SV), рассчитывается на основе применения стандартного метода оценки [Chulliat et al., 2010], т.е. как разница среднемесячного значения компоненты геомагнитного поля за временной интервал $t + 6$ и $t - 6$ мес.

Сегментированный регрессионный анализ

При выделении геомагнитных джерков исследователи чаще всего прибегают к построению регрессионных моделей, при этом в ходе визуального осмотра данных выделяют место изменения наклона производной и на участках оценивают уравнения регрессии, полагая, что его коэффициенты не меняются во времени на этом участке. Однако с точки зрения исследования временной динамики геомагнитных джерков такой метод не совсем корректен.

По нашему мнению, в качестве метода определения наклона первой производной вековой вариации и его изменений целесообразно использовать сегментированный регрессионный анализ.

Сегментированная регрессия – это метод регрессионного анализа, при котором независимая переменная разбивается на интервалы и каждому интервалу соответствует отдельный отрезок линии [Drajer, Smith, 2014]. Границы между сегментами называются точками останова или точками переключения [Freund et al., 2006].

Если расположение точек переключения известно, то регрессионный анализ заключается в подгонке непрерывных кусочно-линейных функций с помощью метода наименьших квадратов [Golovchenko, 2004]. Итак, пусть x – независимая переменная, а y зависит от x , так что $y(x)$, тогда данные могут быть объединены в пары:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix},$$

где (x_1, y_1) представляет первую точку данных. Точки данных должны быть упорядочены в соот-

ветствии с $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n$, где n – число точек данных. Кусочно-линейная функция может быть описана как следующий набор функций:

$$y(x) = \begin{cases} \eta_1 + m_1(x - b_1), & b_1 < x \leq b_2 \\ \eta_2 + m_2(x - b_2), & b_2 < x \leq b_3 \\ \vdots \\ \eta_{n_b-1} + m_{n_b-1}(x - b_{n_b-1}), & b_{n_b-1} < x \leq b_{n_b}, \end{cases}$$

где: b_1 – координата x первой точки останова; b_2 – координата x второй точки останова и так далее до последней точки останова b_{n_b} [Hawkins, 1972]. Имеется n_b точек останова и $n_b - 1$ отрезков. Подобно порядку данных эта формулировка также предполагает, что точки останова упорядочены как $b_1 < b_2 < \dots < b_{n_b}$.

Приведенное выше уравнение представляет собой набор кусочно-линейных функций. Если установить, что кусочно-линейные функции C^0 непрерывны в области, то наклоны и точки пересечения каждой линейной области становятся зависимыми от предыдущих значений. Тогда кусочные функции сводятся к следующему:

$$y(x) = \begin{cases} \beta_1 + \beta_2(x - b_1), & b_1 < x \leq b_2 \\ \beta_1 + \beta_2(x - b_1) + \beta_3(x - b_2), & b_2 < x \leq b_3 \\ \vdots \\ \beta_1 + \beta_2(x - b_1) + \beta_3(x - b_2) + \dots + \beta_{n_b}(x - b_{n_b-1}), & b_{n_b-1} < x \leq b_{n_b}, \end{cases}$$

что приводит к тому же количеству неизвестных параметров β -модели, что и количество точек останова. Эти кусочные функции могут быть выражены в матричной форме как:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 - b_1 & (x_1 - b_2)\ell_{x_1 > b_2} & \dots & (x_1 - b_{n_b-1})\ell_{x_1 > b_{n_b-1}} \\ 1 & x_2 - b_1 & (x_2 - b_2)\ell_{x_2 > b_2} & \dots & (x_2 - b_{n_b-1})\ell_{x_2 > b_{n_b-1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n - b_1 & (x_n - b_2)\ell_{x_n > b_2} & \dots & (x_n - b_{n_b-1})\ell_{x_n > b_{n_b-1}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},$$

где $\ell_{x_n > b_1}$ – индикаторная функция. Индикаторные функции можно описать как кусочные функции, равные либо 0, либо 1, например:

$$\ell_{x_n > b_2} = \begin{cases} 0 & x_n \leq b_2 \\ 1 & x_n > b_2 \end{cases}$$

и

$$\ell_{x_n > b_3} = \begin{cases} 0 & x_n \leq b_3 \\ 1 & x_n > b_3 \end{cases}$$

и т.д.

Это простая линейная система уравнений:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{y},$$

где: \mathbf{A} – матрица регрессии размера $n \times n_b$; $\boldsymbol{\beta}$ – вектор ($n_b \times 1$) неизвестных параметров; \mathbf{y} – вектор ($n \times 1$) из точек данных.

Задача наименьших квадратов решается для неизвестного $\boldsymbol{\beta}$, что уменьшает сумму квадратов остатков, и решение выражается как:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{y}.$$

После того как $\boldsymbol{\beta}$ решено, остаточный вектор равен:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A}\boldsymbol{\beta} - \mathbf{y},$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор размера $n \times 1$. Остаточный вектор представляет собой разницу между подобранной непрерывной кусочно-линейной моделью и исходным набором данных. Тогда сумма квадратов остатков равна:

$$SSR = \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon},$$

которая является L^2 -нормой остаточного вектора.

В нашем случае сложность применения подгонки кусочно-линейной функцией заключалась в том, что местоположения точек останова нам неизвестны [Chen et al., 2011]. С целью поиска наилучшего набора местоположений точек останова нами была использована процедура глобальной оптимизации [Yang et al., 2016], при этом заранее задается число таких точек, причем первая точка останова равна $b_1 = x_1$ (или наименьшему x), а последняя точка останова равна $b_{n_b} = x_n$ (или наибольшему x). В этом случае необходимо оценить $n_b - 2$ неизвестных местоположений точек останова [Wainer, 1971].

Анализ имеющихся в литературе данных показывает, что за период с 2004 по 2020 гг. геомагнитные джерки были обнаружены в 2007 г. [Olsen et al., 2009]; 2011 г. [Рябова, 2019; Chulliat, Maus, 2014]; 2014 г. [Рябова, 2019; Torta et al., 2015; Kotzé, 2017] и в 2017 г. [Whaler et al., 2020]. В связи с этим при выполнении настоящих исследований было задано число точек переключения $n_b = 6$.

Сумма квадратов остатков может быть представлена как функция, зависящая от местоположения точек останова $SSR(b)$. Тогда задача оптимизации заключается в минимизации $SSR(b)$, $b = [b_2, \dots, b_{n_b-1}]^T$ при $x_1 \leq b_k \leq x_n$, $k = 1, 2, \dots, n_b$ [Yang et al., 2016].

При решении задачи оптимизации в настоящей работе используется **алгоритм дифференциальной эволюции** (наиболее успешный стохастический метод глобальной оптимизации функций вещественных переменных) [Ahmad et al., 2022]. Алгоритм дифференциальной эволюции (Differential Evolution или DE) был предложен в 1995 г. Р. Сторном и К. Прайсом для решения задач многомерной оптимизации [Storn, Price, 1997]. Достоинством этого метода является сравнительная простота реализации, недостатком — необходимость в многократном обращении к целевой функции, что приводит к увеличению времени расчетов [Ahmad et al., 2022].

Работа алгоритма DE начинается с генерации случайным образом множества случайных векторов (называемых поколением), представляющих собой возможные решения задачи оптимизации [Das et al., 2016]. В нашем случае поколение представляет собой множество решений задачи минимизации $SSR(b)$. На каждой итерации алгоритм генерирует новое поколение векторов, случайным образом комбинируя векторы из предыдущего поколения. Генерация векторов нового поколения производится следующим образом. Для каждого вектора из старого поколения выбираются три различных случайных вектора среди

векторов старого поколения, за исключением самого вектора, и генерируется так называемый мутантный вектор. Над мутантным вектором выполняется операция “скрещивания”, состоящая в том, что некоторые его координаты замещаются соответствующими координатами из базового вектора. Полученный после скрещивания вектор называется пробным вектором. Если он оказывается лучше базового вектора (значение целевой функции улучшилось), то в новом поколении базовый вектор заменяется на пробный, в противном случае базовый вектор сохраняется в новом поколении. Подробный алгоритм дифференциальной эволюции, используемый в настоящей работе, представлен в работе [Price et al., 2005].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены вариации первой производной компонент B_x , B_y и B_z геомагнитного поля, рассчитанные по среднегодовым значениям по данным обсерватории “Будков”.

Анализ данных, представленных на рис. 1, показал, что наибольший разброс вариации геомагнитного поля наблюдается в северной компоненте геомагнитного поля, что объясняется возможной сильной зависимостью изменений в этой компоненте от эффектов внешнего поля. Однако из рис. 1 видно, что разброс не влияет на морфологию поведения вековой вариации. Применение сегментированного регрессионного анализа с определением оптимального положения точки переключения с помощью алгоритма дифференциальной эволюции позволило четко идентифицировать джерки (изменение наклона первой производной вековой вариации) для B_x -компоненты магнитного поля в июне 2007 г., в октябре 2011 г. и в марте 2018 г.

Меньший разброс первой производной по сравнению с северной компонентой геомагнитного поля наблюдается в вертикальной компоненте B_z на обсерватории “Будков”. В этом случае с помощью метода кусочно-линейной регрессии удалось выделить следующие геомагнитные джерки 2007 г. (июнь 2007 г.), 2014 г. (январь 2015 г.) и 2017 г. (март 2018 г.).

В вековом изменении восточной компоненты магнитного поля наиболее ярко проявляются геомагнитные джерки, более того четко идентифицируются джерки, даже плохо различимые в двух других компонентах, а именно в северной компоненте геомагнитного поля — джерк 2014 г. и в вертикальной компоненте — джерк 2011 г. Такое поведение можно объяснить тем, что восточная компонента магнитного поля Земли менее чувствительна к изменениям внешнего происхождения (особенно магнитосферного), что позволяет

Пункты геомагнитной регистрации

Название	Код	Широта	Долгота	Высота	Месторасположение	Магнитометрический прибор
Обсерватория “Будков” Геофизического института Академии наук Чешской Республики	BDV	49.08° с.ш.	14.02° в.д.	496 м	Чешская Республика, г. Прахатице	Система G-DAS с трехосным магнитометром DMI fluxgate (разрешение 0.1 нТл)
Центральная Геофизическая обсерватория “Бельск” Геофизического института Польской Академии наук	BEL	51.84° с.ш.	20.79° в.д.	180 м	Польша, г. Бельск	Торсионный кварцевый вариометр системы В.Н. Боброва (разрешение 0.01 нТл)
Геофизическая обсерватория “Борок” Института физики Земли Российской Академии наук	BOX	58.03° с.ш.	38.14° в.д.	115 м	Россия, Ярославская область, пос. Борок	Феррозондовый магнитометр IGPV VM391 (разрешение 0.1 нТл)
Обсерватория геомагнетизма Адольфа Шмидта в Немегке	NGK	52.07° с.ш.	12.68° в.д.	78 м	Германия, г. Немегк	Система GEOMAG (разрешение 0.1 нТл)

значительно легче выделить изменения, обусловленные процессами в недрах Земли.

Представленные на рис. 2 данные о вариации первой производной компонент геомагнитного поля B_x , B_y и B_z , зарегистрированных на обсерватории “Борок”, демонстрируют аналогичную динамику вековой вариации. В северной компоненте наблюдалось увеличение вплоть до июня 2007 г., которое сменилось спадом до октября 2011 г. Затем опять наблюдалось Λ -образное изменение, с ростом с октября 2011 г. по январь 2015 г. и спадом с января 2015 г. по март 2018 г. Противоположное направление изменений демонстрируют вариации первой производной компонент B_y и B_z геомагнитного поля, однако в B_z -компоненте почти не выделяется джерк 2011 г.

Аналогичные результаты получены при вычислении первых производных компонент геомагнитного поля по данным обсерватории “Бельск” и обсерватории геомагнетизма Адольфа Шмидта в Немегке.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты оценки вековой вариации восточной геомагнитной компоненты. Идентификация точки переключения (в нашем случае, геомагнитного джерка) алгоритмом дифференциальной эволюции показала, что и в этих пунктах наблюдений можно определить геомагнитные джерки 2007 г. (июнь 2007 г.), 2011 г. (октябрь 2011 г.), 2014 г. (январь 2015 г.) и 2017 г. (март 2018 г.).

Здесь следует отметить, что трудности с идентификацией нескольких джерков (2011 г. и 2014 г.) в северной и вертикальной компонентах на обсерваториях, вероятно, связаны с тем, что годы, близкие к солнечному максимуму, более загряз-

нены внешними эффектами по сравнению с годами солнечного минимума.

Итак, в настоящей работе на основе анализа данных регистрации геомагнитного поля на нескольких среднеширотных обсерваториях за период с 2004 по 2020 гг. выявлены джерки, частота повторения которых составляет 3–4 года.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведенный в предыдущем разделе достаточно четкий результат о квазипериодическом повторении джерков до настоящего времени не имеет определенного обоснования. Попытки связать квазипериодический источник джерков с крутильными колебаниями в ядре [Vloxham et al., 2002; Gillet et al., 2010] не согласуются ни с периодом этих колебаний (около 6 лет), ни с часто наблюдаемым локальным проявлением джерков.

Вместе с тем, достаточно быстрые изменения в вековых вариациях поля, отмечаемые как джерки, указывают на возможное существование достаточно быстрых нестабильных процессов в жидком ядре Земли. В частности, была рассмотрена возможность генерации классической магниторотационной неустойчивости (МРН) в жидком ядре (впервые примененной к аккреционным дискам звезд и галактик [Велихов, 1959]) при условии, что дифференциальное вращение в ядре (когда зависимость азимутальной скорости вращения жидкости от радиуса подчиняется условию $d\Omega / dr < 0$) обусловлено анизотропией конвекции (конвективные ячейки). Для инкремента неустойчивости было получено следующее выражение [Шалимов, 2014]:

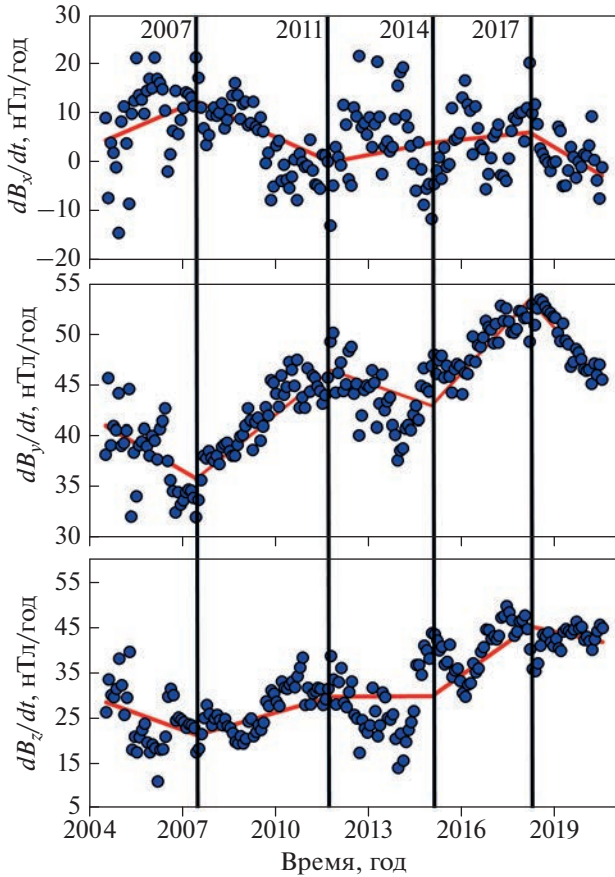


Рис. 1. Первая производная по времени среднемесячных вариаций трех компонент геомагнитного поля (синие кружочки) на обсерватории “Будков” за период 2004–2020 гг.; здесь и на следующих рисунках красной линией показан наклон производной, вычисленный методом сегментированной регрессии.

$$\gamma_m = \frac{1}{2} \left| r \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right| \frac{\sqrt{1 + \Lambda^2} - 1}{\Lambda} = \frac{v_z}{L} \frac{\sqrt{1 + \Lambda^2} - 1}{\Lambda}. \quad (1)$$

Здесь: $\Lambda = V_A^2 / 2\eta\Omega$ – число Эльзассера; V_A – альвеновская скорость; η , Ω – коэффициент магнитной диффузии и скорость вращения Земли; v_z – скорость конвекции вдоль вертикального геомагнитного поля; L – характерный масштаб.

Согласно работе [Голицын, 2004], среднюю скорость плотностной конвекции во вращающихся телах можно оценить по формуле:

$$V = C\sqrt{Mg/\rho\Omega}, \quad (2)$$

где: M – поток дефицита плотности; g – ускорение силы тяжести; Ω – угловая скорость вращения внутреннего ядра; C – константа порядка единицы.

Поток дефицита плотности можно определить как $M = \dot{M}/S$, где S – площадь поверхности

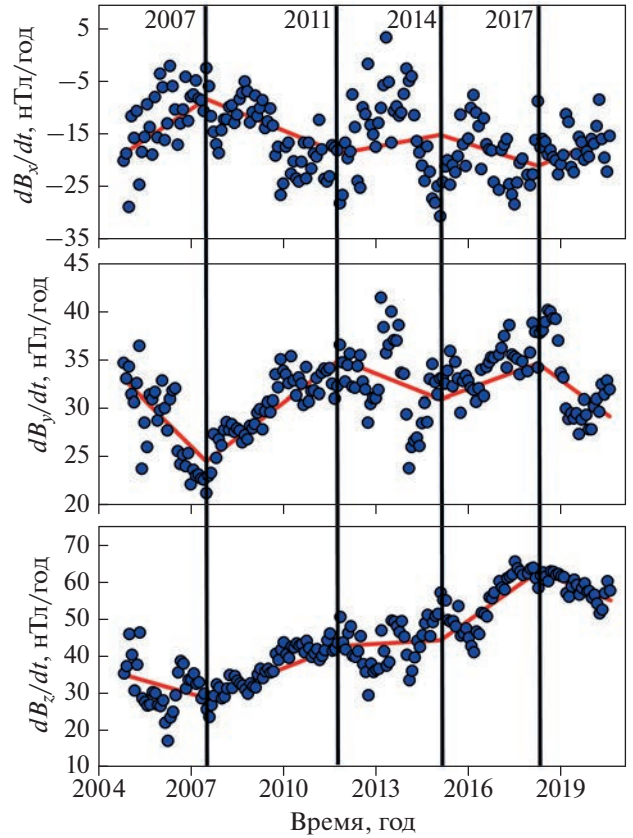


Рис. 2. Первая производная по времени среднемесячных вариаций трех компонент геомагнитного поля (синие кружочки) на обсерватории “Борок” за период 2004–2020 гг.

внутреннего ядра, \dot{M} – скорость затвердевания внутреннего ядра. Эта скорость была оценена [Loper, Roberts, 1983] по современным размерам внутреннего ядра и времени его жизни, и оказалась равной 10^6 кг/с. Следовательно, из формулы (2) получаем при $g = 4.4$ м/с², $\Omega = 7.3 \times 10^{-5}$ с⁻¹, $\rho = 1.3 \times 10^4$ кг/м³ для скорости конвекции $V = C\sqrt{Mg/S\rho\Omega} \approx 10^{-3}$ м/с, а из формулы (1) при $v_z \sim V$, $L \geq 500$ км [Roberts, Glatzmaier, 2000] получаем оценку характерного времени развития неустойчивости γ_m^{-1} : для $\Lambda \gg 1$ находим $\gamma_m^{-1} \leq 1$ года, а при $\Lambda \sim 1$ – $\gamma_m^{-1} \approx 3$ года. Таким образом, характерное время развития неустойчивости оказывается одного порядка с временем развития джерков, причем этот вывод подтверждается наблюдениями джерков посредством спутников с высоким разрешением [Pais, Jault, 2008].

Если предположить, что джерки обусловлены развитием МРН, то возникает вопрос: с чем связана квазипериодичность проявления джерков (с периодом 3–4 года), отмечаемая в настоящей ра-

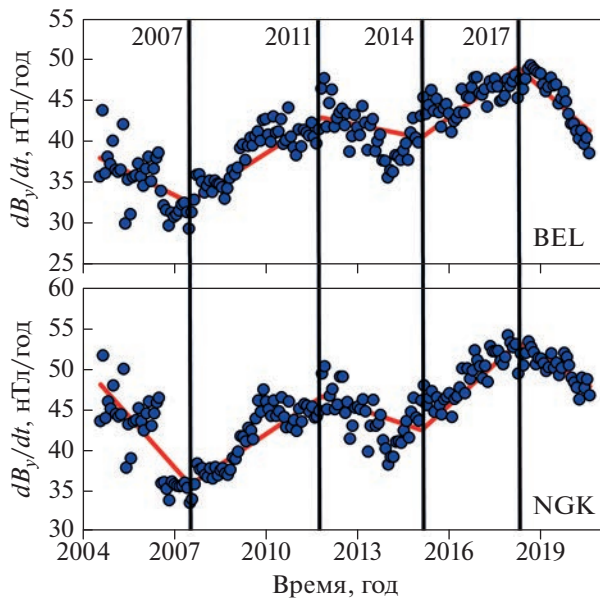


Рис. 3. Первая производная по времени среднемесячных вариаций восточной компоненты геомагнитного поля (синие кружочки) на обсерваториях “Бельск” (BEL) и “Нимегк” (NGK) за период 2004–2020 гг.

боте и некоторыми авторами (см. [Pavon-Carrasco et al., 2021]). Квазипериодичность можно объяснить следующим образом. За время порядка обратного инкремента МРН, обусловленной дифференциальным вращением жидкого ядра, магнитное поле нарастает. Ограничение роста амплитуды поля может быть связано с нелинейными или диссипативными процессами. В последнем случае вытягиваемые из-за вращения по азимуту силовые трубки будут подвержены быстрому процессу пересоединения соседних областей с противоположно направленными полями. Момент пересоединения силовых линий соответствует моменту джерка с последующим уменьшением поля. Однако неустойчивость будет развиваться снова за счет дифференциального вращения, обусловленного конвекцией, и начало развития неустойчивости будет регистрироваться как следующий джерк, связанный с переходом к росту поля.

Таким образом, в настоящей работе с использованием измерений вариаций геомагнитного поля на нескольких среднеширотных обсерваториях и с применением специальных методик выделена серия геомагнитных джерков за 17 лет (точнее, с 2004 по 2020 гг.). Показано, что джерки следуют с квазипериодом 3–4 года. Предложен механизм возникновения быстрых изменений геомагнитного поля, обусловленный магниторотационной неустойчивостью в ядре Земли, который позволяет интерпретировать указанные характерные времена появления джерков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”, интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС. 2021. 264 с.
- Велихов Е.П. Устойчивость течения идеально проводящей жидкости между вращающимися цилиндрами в магнитном поле // Журн. экспериментальной и теоретической физики. 1959. Т. 36. № 5. С. 1398–1404.
- Голицын Г.С. Динамика природных явлений. М.: Физматлит. 2004. 344 с.
- Калинин Ю.Д. Вековые геомагнитные вариации и изменения длины суток // Метеорология и гидрология. 1949. № 3. С. 15–19.
- Рябова С.А. Особенности вековой вариации геомагнитного поля на среднеширотных обсерваториях “Михнево” и “Бельск” // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 125–136.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018060147>
- Шалимов С.Л. О магниторотационной неустойчивости в земном ядре // Физика Земли. 2014. № 4. С. 3–7.
- Шалимов С.Л., Ольшанская Е.В. О вариациях частоты вращения Земли, обусловленных нестабильными течениями в жидком ядре // Физика Земли. 2016. № 6. С. 139–143.
- Abarca del Rio R., Gambis D., Salstein D.A. Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum // *Annales Geophysicae*. 2000. V. 18. P. 347–364.
- Ahmad M.F., Isa N.A.M., Lim W.H., Ang K.M. Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works // *Alexandria Engineering J.* 2022. V. 61. № 5. P. 3831–3872.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.013>
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., LeMouel J.L. Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis // *J. Geophysical Research*. 1995. V. 100. P. 12557–12572.
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., LeMouel J.L. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks // *J. Geophysical Research*. 1996. V. 101. P. 21975–21994.
- Alexandrescu M., Gibert D., LeMouel J.L., Hulot G. An estimate of average lower mantle conductivity by wavelet analysis of geomagnetic jerks // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. P. 17135–17746.
- Bloxham J., Zatman S., Dumberry M. The origin of geomagnetic jerks // *Nature*. 2002. V. 420. P. 65–68.
- Brown W., Mound J., Livermore P. Jerks abound: an analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008 // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2013. V. 223. P. 62–76.
- Chen C.W.S., Chan J.S.K., Gerlach R., Hsieh W.Y.L. A comparison of estimators for regression models with change points // *Statistics and Computing*. 2011. V. 21. P. 395–414.
<https://doi.org/10.1007/s11222-010-9177-0>
- Chulliat A., Maus S. Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from

- 2000 to 2010 // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2014. V. 119. P. 1531–1543.
- Chulliat A., Thébaud E., Hulot G.* Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. № 7. L07301.
<https://doi.org/10.1029/2009GL042019>
- Courtillot V., Le Mouel J.L.* Time variations of the Earth's magnetic field: From daily to secular // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1988. V. 16. P. 389–476.
- Das S., Mullick S.S., Seganthan P.N.* Recent Advances in Differential Evolution – an Updated Survey // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2016. V. 27. P. 1–30.
- Draper N.R., Smith H.* Applied regression analysis. 3rd ed. V. 326. N.Y.: John Wiley & Sons. 2014. 158 p.
- Duan P., Huang C.* Intradecadal variations in length of day and their correspondence with geomagnetic jerks // *Nature Communications*. 2020. V. 11.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16109-8>
- Freund R.J., Wilson W.J., Sa P.* Regression analysis. 2nd ed. N.Y.: Academic Press. 2006. 270 p.
- Gillet N., Jault D., Canet E., Fournier A.* Fast torsional waves and strong magnetic field within the Earth's core // *Nature*. 2010. V. 465. P. 74–77.
- Gire C., Le Mouel J.L., Ducruix J.* Evolution of the geomagnetic secular variation field from the beginning of the century // *Nature*. 1984. V. 307. P. 349–352.
- Golovchenko N.* Least-squares fit of a continuous piecewise linear function. 2004. <http://golovchenko.org/docs/ContinuousPiecewiseLinearFit.pdf>
- Hawkins D.M.* On the choice of segments in piecewise approximation // *IMA Journal of Applied Mathematics*. 1972. V. 9. № 2. P. 250–256.
- Holme R., de Viron O.* Geomagnetic jerks and a high-resolution length-of-day profile for core studies // *Geophysical Journal International*. 2005. V. 160. № 2. P. 435–439.
- Jackson A.* Time-dependency of tangentially geostrophic core surface motions // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1997. V. 103. P. 293–311.
- Jankowski J., Marianiuk J., Ruta A., Sucksdorff C., Kivinen M.* Long-term stability of a torque-balance variometer with photoelectric converters in observatory practice // *Surveys in Geophysics*. 1984. V. 6. № 3/4. P. 367–380.
- Jault D., Gire C., Le Mouel J.L.* Westward drift, core motions and exchanges of angular momentum between core and mantle // *Nature*. 1988. V. 333. P. 353–356.
- Kotzé P.B.* The 2014 geomagnetic jerk as observed by southern African magnetic observatories // *Earth, Planets Space*. 2017. V. 69. № 17.
<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0605-7>
- Le Mouel J.L., Ducruix J., Duyen C.H.* The worldwide character of the 1969–70 impulse of the secular variation rate // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1982. V. 28. P. 337–350.
- Loper D.E., Roberts P.H.* Stellar and Planetary Magnetism // Soward A.M. (ed.). N.Y.: Gordon and Breach. 1983. 297 p.
- Macmillan S.* A geomagnetic jerk for the early 1990's // *Earth and Planetary Science Letters*. 1996. V. 137. P. 189–192.
- Mandea M., Bellanger E., Le Mouel J.-L.* A geomagnetic jerk of the end of the 20th century // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. V. 183. P. 369–373.
- Mandea M., Holme R., Pais A., Pinheiro K., Jackson A., Verbanac G.* Geomagnetic jerks: Rapid core field variations and core dynamics // *Space Science Reviews*. 2010. V. 155. P. 147–175.
- Nagao H., Iyemori T., Higuchi T., Araki T.* Lower mantle conductivity anomalies estimated from geomagnetic jerks // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. V. 108.
<https://doi.org/10.1029/2002JB001786>
- Olsen N., Mandea M.* Rapidly changing flows in the Earth's core // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. № 6. P. 390–394.
- Olsen N., Mandea M., Sabaka T.J., Toffner-Clausen L.* CHAOS-2-A geomagnetic field model derived from one decade of continuous satellite data // *Geophysical J. International*. 2009. V. 179. № 3. P. 1477–1487.
- Pais M.A., Jault D.* Quasi-geostrophic flows responsible for the secular variation of the Earth's magnetic field // *Geophysical J. International*. 2008. V. 173. № 2. P. 422–443.
- Pavon-Carrasco F.J., Marsal S., Campuzano S.A., Torta J.M.* Signs of a new geomagnetic jerk between 2019 and 2020 from Swarm and observatory data // *Earth, Planets and Space*. 2021. V. 73.
<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01504-2>
- Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A.* Differential evolution: A practical approach to global optimization 1st ed. Springer: Berlin. 2005. 558 p.
- Roberts P.H., Glatzmaier G.A.* Geodynamo theory and simulations // *Reviews of Modern Physics*. 2000. V. 72. P. 1081–1123.
- Storn R., Price K.* Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // *J. Global Optimization*. 1997. V. 11. № 4. P. 341–359.
- Torta J.M., Pavón-Carrasco F.J., Marsal S., Finlay C.C.* Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014 // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 7933–7940.
- Wainer H.* Piecewise regression: A simplified procedure // *British J. Mathematical and Statistical Psychology*. 1971. V. 24. № 1. P. 83–92.
- Walker J.B., O'Dea P.L.* Geomagnetic secular change impulses // *Transactions of the American Geophysical Union*. 1952. V. 33. P. 797–800.
- Weber F.V., Roberts E.B.* The 1950 world isogonic chart // *J. Geophysical Research*. 1951. V. 56. P. 81–84.
- Whaler K., Hammer M., Finlay C., Olsen N.* Core-mantle boundary flows obtained purely from Swarm secular variation gradient information // *EGU General Assembly 2020*. Online. 2020. EGU2020-9616.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9616>
- Yang L., Liu S., Tsoka S., Papageorgiou L.G.* Mathematical programming for piecewise linear regression analysis // *Expert Systems with Applications*. 2016. V. 44. P. 156–167.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.034>
- <http://www.intermagnet.org> сайт Международной магнитной сети INTERMAGNET (International RealTime Magnetic Observatory Network.)

On Short-Period Dynamics in the Earth's Core According to Ground-Based Observations of Geomagnetic Jerks

S. A. Riabova^{a, b,*} and S. L. Shalimov^a

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

^b*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**E-mail: riabovasa@mail.ru*

The use of a special technique for processing variations of the geomagnetic field at several mid-latitude observatories allowed us to identify a series of jerks over a 17-year period, from 2004 to 2020. To interpret the experimental results showing that jerks follow with a quasi period of 3–4 years, a probable mechanism of the occurrence of rapid changes in the geomagnetic field caused by unstable processes in the Earth's core is proposed.

Keywords: geomagnetic jerks, the Earth's core, magnetorotational instability