ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 506, № 2, с. 214–218

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.38

О ПОВТОРЯЕМОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ДЖЕРКОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СРЕДНЕШИРОТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЯХ

© 2022 г. С. А. Рябова[1,2,*], С. Л. Шалимов[1]

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 24.05.2022 г.
Поступило 24.05.2022 г.
После доработки 03.06.2022 г.
Принято к публикации 17.06.2022 г.

Применение специальной методики для обработки вариаций геомагнитного поля на нескольких среднеширотных обсерваториях позволило выделить серию джерков более чем за декаду, с 2004 по 2020 г. 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.

Ключевые слова: геомагнитные джерки, ядро Земли, магниторотационная неустойчивость

DOI: 10.31857/S2686739722600813

Геомагнитные джерки определяют как излом в скорости вековых вариаций (V-образное изменение первой производной, скачок второй производной) одной (как правило, восточной) или нескольких компонент магнитного поля Земли. Соответственно, в рамках метода математической обработки измерений временных вариаций геомагнитного поля могут применяться различные критерии выделения джерков. В то же время физические процессы, обусловливающие джерки, включая причины их появления, их повторяемости, пространственное распределение (временные задержки их регистрации на разных станциях), не имеют общепринятого объяснения, хотя надежно установлено внутриземное происхождение джерков [1].

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 г.).

В работе использованы данные регистрации 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 Нимегке. Координаты и месторасположение обсерваторий приведены в табл. 1.

Данные регистрации компонент геомагнитного поля на всех этих обсерваториях размещены на сайте Международной магнитной сети INTERMAGNET (http://www.intermagnet.org).

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 [2].

При выполнении настоящих исследований 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 [3], т.е. как разница среднемесячного значения компоненты геомагнитного поля за временной интервал $t + 6$ и $t - 6$ месяцев.

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 коэффи-

[1] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: riabovasa@mail.ru*

Таблица 1. Пункты геомагнитной регистрации

Название	Код	Широта	Долгота	Высота	Месторасположение
Обсерватория “Будков” Геофизического института Академии наук Чешской Республики	BDV	49.08° с.ш.	14.02° в.д.	496 м	Чешская Республика, г. Прахатице
Центральная Геофизическая обсерватория “Бельск” Геофизического института Польской академии наук	BEL	51.84° с.ш.	20.79° в.д.	180 м	Польша, г. Бельск
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
Обсерватория геомагнетизма Адольфа Шмидта в Нимегке	NGK	52.07° с.ш.	12.68° в.д.	78 м	Германия, г. Нимегк

циенты не меняются во времени на этом участке. Однако с точки зрения исследования временной динамики геомагнитных джерков такой метод не совсем корректен.

По нашему мнению, целесообразно строить кусочно-заданные регрессии с некоторым количеством точек переключения [4]. Если расположение точек переключения известно, то регрессионный анализ заключается в подгонке непрерывных кусочно-линейных функций с помощью метода наименьших квадратов [5]. В нашем случае сложность применения подгонки кусочно-линейной функцией заключалась в том, что местоположения точек переключения нам неизвестны.

С целью поиска наилучшего набора местоположений точек переключения нами была использована процедура глобальной оптимизации. При решении задачи оптимизации в настоящей работе применялся алгоритм дифференциальной эволюции (наиболее успешный стохастический метод глобальной оптимизации функций вещественных переменных) [6].

Анализ имеющихся в литературе данных показывает, что за период с 2004 по 2020 г. геомагнитные джерки были обнаружены в 2007 г. [7], в 2011 г. [8, 9], в 2014 г. [8, 10] и в 2017 г. [11]. В связи с этим при выполнении настоящих исследований было задано число точек переключения $n_b = 6$.

В качестве примера на рис. 1 приведены вариации первой производной восточной компоненты геомагнитного поля, рассчитанные по среднегодовым значениям. Кроме того, на рис. 1 приведены результаты вычислений методом сегментированного регрессионного анализа с определением оптимального положения точки переключения с помощью алгоритма дифференциальной эволюции. Из данных, представленных на рис. 1, видно, что применение предложенного в настоящей работе метода позволило четко идентифицировать геомагнитные джерки (изменение наклона первой производной вековой вариации) для восточной компоненты магнитного поля в июне 2007 г. (джерк 2007 г.), в октябре 2011 г. (джерк 2011 г.), в январе 2015 г. (джерк 2014 г.) и в марте 2018 г. (джерк 2017 г.).

Анализ результатов инструментальных наблюдений показывает, что в вековом изменении наиболее ярко проявляются геомагнитные джерки именно в восточной компоненте магнитного поля. Более того, в этой компоненте 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 значительно легче выделить изменения, обусловленные процессами в недрах Земли. Геомагнитные джерки 2011 г. и 2014 г. идентифицируются хуже, поскольку временные интервалы, на которых выполнялся расчет регрессии, содержат годы, близкие к солнечному максимуму, которые более загрязнены внешними эффектами по сравнению с годами солнечного минимума.

Итак, в настоящей работе на основе анализа данных трехкомпонентной регистрации геомагнитного поля на четырех станциях магнитометрических наблюдений, выполненной в период с 2004 по 2020 г., выявлены геомагнитные джерки (табл. 2): 2007 г., 2011, 2014 г. и 2017 г. Это позволяет сделать вывод о том, что частота повторения геомагнитных джерков составляет 3–4 года.

Приведенный результат о квазипериодическом повторении джерков до настоящего времени не имеет устоявшегося объяснения. Попытки связать квазипериодический источник джерков с крутильными колебаниями в ядре [12, 13] не согласуются ни с периодом этих колебаний (около

6 лет), ни с часто наблюдаемым локальным проявлением джерков.

Вместе с тем достаточно быстрые процессы, которые обусловливают появление джерков, можно связать с протеканием нестабильных процессов в жидком ядре Земли. В частности, таким процессом может быть классическая магниторотационная неустойчивость (неустойчивость Велихова [14]) при условии, что дифференциальное вращение в ядре (когда зависимость азимутальной скорости вращения жидкости от радиуса подчиняется условию $d\Omega/dr < 0$) обусловлено анизотропией конвекции. Инкремент неустойчивости имеет вид [15]:

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

где $\Lambda = V_A^2/2\eta\Omega$ – 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. Оценивая скорость конвекции по формуле [16] $V = C\sqrt{\dot{M}g/S\rho\Omega}$, где S – площадь поверхности внутреннего ядра, $\dot{M}$ – скорость его затвердевания, равная 10^6 кг/с [17], при $g = 4.4$ м/с^2, $\Omega = 7.3 \times 10^{-5}$ с$^{-1}$, $\rho = 1.3 \times 10^4$ кг/м^3 для скорости конвекции получим 10^{-3} м/с, а из формулы (1) при $v_z \sim V$, $L \geq 500$ км 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 [18].

Если предположить теперь, что джерки обусловлены развитием указанной неустойчивости, то квазипериодичность проявления джерков (с периодом 3–4 года), отмечаемая в настоящей работе, а также и другими авторами [19], можно объяснить следующим образом. За время порядка обратного инкремента неустойчивости, 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 в соседних областях с противоположно направленными полями. Однако неустойчивость будет развиваться снова за счет дифференциального вращения, обусловленного конвекцией.

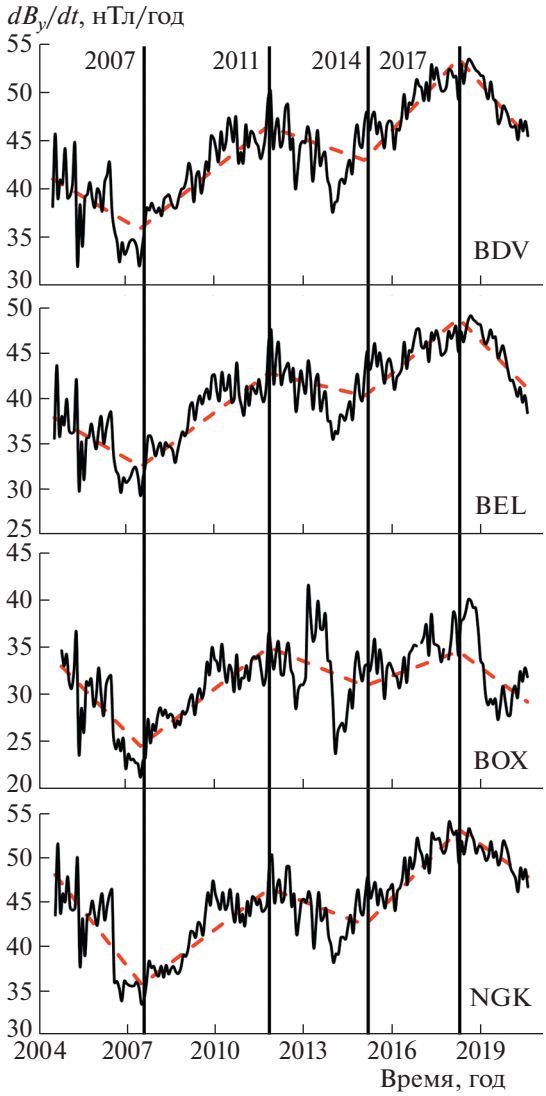

Рис. 1. Первая производная по времени среднемесячных вариаций восточной компоненты геомагнитного поля (сплошная черная линия) на обсерваториях: “Будков” (BDV), “Бельск” (BEL), “Борок” (BOX) и на обсерватории геомагнетизма Адольфа Шмидта в Нимегке (NGK) за период 2004–2020 гг.; красной штриховой линией показан наклон производной, вычисленный кусочно-заданной регрессией с точками переключения.

Таким образом, в настоящей работе с использованием измерений вариаций геомагнитного поля на нескольких среднеширотных обсерваториях и с применением специальных методик выделена серия геомагнитных джерков более чем за декаду (точнее, с 2004 по 2020 г.). 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.

Таблица 2. Результаты идентификации геомагнитных джерков

Компонента	Геомагнитный джерк			
	2007 г.	2011 г.	2014 г.	2017 г.
Обсерватория “Будков”				
северная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	–	март 2018 г.
восточная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	январь 2015 г.	март 2018 г.
вертикальная	июнь 2007 г.	–	январь 2015 г.	март 2018 г.
Геофизическая обсерватория “Бельск”				
северная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	–	март 2018 г.
восточная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	январь 2015 г.	март 2018 г.
вертикальная	июнь 2007 г.	–	январь 2015 г.	март 2018 г.
Геофизическая обсерватория “Борок”				
северная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	январь 2015 г.	март 2018 г.
восточная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	январь 2015 г.	март 2018 г.
вертикальная	июнь 2007 г.	–	январь 2015 г.	март 2018 г.
Обсерватория геомагнетизма Адольфа Шмидта в Нимегке				
северная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	–	март 2018 г.
восточная	июнь 2007 г.	октябрь 2011 г.	январь 2015 г.	март 2018 г.
вертикальная	июнь 2007 г.	–	январь 2015 г.	март 2018 г.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

1. *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. https://doi.org/10.1007/s11214-010-9663-x
2. *Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А.* Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
3. *Chulliat A., Thébault 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
4. *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
5. *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
6. *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 Journal. 2022. V. 61. № 5. P. 3831–3872. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.013
7. *Olsen N., Mandea M., Sabaka T.J., Tøffner-Clausen L.* CHAOS-2–A geomagnetic field model derived from one decade of continuous satellite data // Geophysical Journal International. 2009. V. 179. № 3. P. 1477–1487. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04386.x
8. *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
9. *Chulliat A., Maus S.* Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. V. 119. № 1531–1543. https://doi.org/10.1002/2013JB010604
10. *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
11. *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. № 19. P. 7933–7940. https://doi.org/10.1002/2015GL065501
12. *Bloxham J., Zatman S., Dumberry M.* The origin of geomagnetic jerks // Nature. 2002. V. 420. P. 65–68.
13. *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.
14. *Велихов Е.П.* Устойчивость течения идеально проводящей жидкости между вращающимися цилин-

драми в магнитном поле // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1959. Т. 36. № 5. С. 1398–1404.

15. *Шалимов С.Л.* О магниторотационной неустойчивости в земном ядре // Физика Земли. 2014. № 4. С. 3–7.
16. *Голицын Г.С.* Динамика природных явлений. М.: Физматлит, 2004. 344 с.
17. *Loper D.E., Roberts P.H.* Stelar and Planetary Magnetism / Ed. Soward A.M. N.Y.: Gordon and Breach, 1983. 297 p.
18. *Pais M.A., Jault D.* Quasi-gestrophic flows responsible for the secular variation of the Earth's magnetic field // Geophysical Journal International. 2008. V. 173. P. 421–443. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03741.x
19. *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. № 175. https://doi.org/10.1186/s40623-021-01504-2

ON THE REPEATABILITY OF GEOMAGNETIC JERKS FROM OBSERVATIONS AT MID-LATITUDE OBSERVATORIES

S. A. Riabova[a,b,#] and S. L. Shalimov[a]

[a] *Schmidt United Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: riabovasa@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin May 24, 2022

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 more than a decade, from 2004 to 2020. To interpret the experimental results showing that jerks follow with a quasi-period of 3–4 years, a mechanism for 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