

В.И. КапытинТОО «Институт ионосферы», Казахстан, г. Алматы
e-mail: kapytin vitality1991@gmail.com

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ВАРИАЦИЙ КОМПОНЕНТ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПЕРИОД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Анализируются фрактальные свойства горизонтальных составляющих геомагнитного поля северного и восточного направления, вертикальной составляющей и интенсивности геомагнитного поля с разрешением 1 сек, измеренных различными геомагнитными обсерваториями сети INTERMAGNET по всему миру в период крупных землетрясений 2023 года. Анализировались вариации магнитного поля при сейсмических событиях, произошедших в разных регионах с магнитудой, превышающей ~6. Методы фрактального анализа применяются для выявления закономерностей и нелинейных взаимосвязей между изменениями компонент геомагнитного поля и проявлениями сейсмической активности. Исследована динамика фрактальной размерности вариаций компонент геомагнитного поля для дней, когда происходило крупное землетрясение. Полученные результаты показывают временное изменение фрактальной размерности компонент геомагнитного поля, выявляя различия в их нерегулярности (сложности). В результате показано, что сильные землетрясения сопровождаются повышенными вариациями магнитного поля Земли.

Ключевые слова: фрактальный анализ, фрактальная размерность, самоподобие, временные ряды, геомагнитное поле; землетрясения.

V.I. Kapytin

Institute of Ionosphere LLP, Kazakhstan, Almaty
e-mail: kapytin vitality1991@gmail.com

Fractal properties of variations in the components of the earth's geomagnetic field during earthquakes

The fractal properties of the horizontal components of the geomagnetic field in the northern and eastern directions, the vertical component and the intensity of the geomagnetic field with a resolution of 1 sec, measured by various geomagnetic observatories of the INTERMAGNET network around the world during the period of major earthquakes in 2023, are analyzed. Magnetic field variations were analyzed during seismic events that occurred in different regions with a magnitude exceeding ~6. Fractal analysis methods are used to identify patterns and nonlinear relationships between changes in geomagnetic field components and manifestations of seismic activity. The dynamics of the fractal dimension of variations in the geomagnetic field components for days when a major earthquake occurred. The results obtained show a temporary change in the fractal dimension of the geomagnetic field components, revealing differences in their irregularity (complexity). The results show that strong earthquakes are accompanied by increased variations in the Earth's magnetic field.

Key words: fractal analysis, fractal dimension, self-similarity, time series, geomagnetic field; earthquakes.

В.И. Капытин

«Ионосфера институты» ЖШС, Қазақстан, Алматы қ.
e-mail: kapytin vitality1991@gmail.com

Жер сілкіну кезіндегі жердің геомагнетикалық өрісінің компоненттеріндегі өзгерулердің фракталдық қасиеттері

Геомагниттік өрістің солтүстік және шығыс бағыттағы көлденең құрамдас бөліктерінің фракталдық қасиеттері, вертикальды құрамдас бөлігі және 1 сек рұқсатымен геомагниттік өрістің қарқындылығы кезең ішінде бүкіл әлем бойынша INTERMAGNET желісінің әртүрлі геомагниттік обсерваторияларымен өлшенген. 2023 жылғы ірі жер сілкіністері талданады. Магнитті өрістің ауытқулары магнитудасы ~6-дан асатын әртүрлі аймақтарда орын алған сейсмикалық оқиғалар кезінде талданған. Фракталды талдау әдістері геомагниттік өріс компоненттерінің өзгерістері

мен сейсмикалық белсенділіктің көріністері арасындағы заңдылықтарды және сызықтық емес қатынастарды анықтау үшін қолданылады. Ірі жер сілкінісі болған күндердегі геомагниттік өріс компоненттерінің вариациясының фракталдық өлшемінің динамикасы. Алынған нәтижелер геомагниттік өріс компоненттерінің фракталдық өлшемінің уақытша өзгеруін көрсетеді, олардың біркелкі еместігінің (күрделілігі) айырмашылықтарын ашады. Нәтижелер күшті жер сілкіністері Жердің магнит өрісіндегі вариациялардың жоғарылауымен бірге жүретінін көрсетеді.

Түйін сөздер: фракталдық талдау, фракталдық өлшем, өзіндік ұқсастық, уақыттық қатар, геомагниттік өріс, жер сілкіністері.

Введение

Краткосрочное предсказание землетрясений имеет жизненно важное значение для человечества в плане смягчения последствий стихийных бедствий [1]. Современные методы прогнозирования землетрясений и их геомагнитных предвестий представляют собой одну из актуальных задач в области геофизики и сейсмологии. В связи с постоянным ростом геологической активности нашей планеты, эффективные и точные инструменты для выявления предвестий стихийных бедствий становятся более необходимыми. Одним из подходов, привлекающих внимание исследователей, является применение фрактального анализа к геомагнитным данным с целью выявления связи между этими данными и готовящимися землетрясениями. В течение последних нескольких десятилетий явления, предшествующие землетрясениям, широко исследовались с целью прогнозирования землетрясений. Среди многих предвестников мы можем перечислить некоторые убедительные тематические исследования сверхнизкочастотного литосферного излучения при сильных землетрясениях, включая Спитакское землетрясение 1988 года [2,3], землетрясение в Лома-Приета в 1989 году [4] и Гуамское землетрясение в 1993 году [5], а также по ионосферным возмущениям для землетрясения Кобе 1995 г. с использованием субионосферных очень низкочастотных/ низкочастотных волн [6]. Затем накопление большого количества тематических исследований огромных землетрясений, таких как землетрясение Чи-Чи в 1999 году, землетрясение на Суматре в 2004 году, землетрясение в Вэньчуани в 2008 году и землетрясение в Японии в 2011 году, показало, что существуют определенные электромагнитные предвестники землетрясений (например [1, 7-11]).

Результаты и обсуждение

Магнитное поле Земли оказывает влияние на окружающую среду и может подвергаться значительным изменениям в преддверии зем-

летрясений. Особый интерес представляет изучение фрактальных свойств в этих данных магнитного поля в период разрушительных землетрясений. Фрактальный анализ, изучающий самоподобие и масштабные закономерности в данных, может предоставить новые инсайты в процессы, протекающие перед и во время землетрясений. Он нашел широкое применение в различных дисциплинах, в том числе связанных с изучением катастрофических явлений и космической погодой [12-13]. В контексте геомагнитных полей, методы фрактального анализа позволяют выделить характерные закономерности, предшествующие сейсмической активности. Фрактальные свойства компонент магнитного поля Земли отражают структурные и пространственные характеристики этого поля на различных масштабах. Важно отметить, что магнитное поле Земли неоднородно и подвержено воздействию различных внутренних и внешних факторов. Фрактальный анализ позволяет исследовать их сложную структуру и поведение. Магнитное поле Земли обладает многомасштабной структурой, что означает наличие различных уровней организации на различных пространственных масштабах. Фрактальный анализ позволяет выявить и изучить эти масштабные закономерности. Магнитное поле Земли может обладать фрактальной размерностью, отражающей сложность его геометрической структуры. Высокие значения фрактальной размерности могут указывать на более сложные и разветвленные структуры. Фрактальные методы позволяют анализировать корреляции между компонентами магнитного поля в различных точках Земли и в различные моменты времени. Эти корреляции могут быть важными при изучении влияния различных геофизических и космических процессов на магнитное поле. Фрактальный анализ также может применяться для изучения магнитных аномалий, которые представляют собой отклонения магнитного поля от средних значений. Аномалии могут иметь фрактальные характеристики в своей пространственной структуре. Изменения

в магнитном поле Земли также могут быть связаны с воздействием внешних факторов, таких как солнечный ветер. Фрактальный анализ позволяет выявлять фрактальные закономерности в ответе магнитного поля на эти воздействия.

В данной статье путем применения методов фрактального анализа к вариациям компонент магнитного поля Земли изучается возможность выявления потенциальных предвестников землетрясений. Фрактальный анализ – это метод исследования структурных и статистических свойств объектов или процессов с использованием понятий фрактальной геометрии. Фрактальная геометрия занимается описанием и измерением фракталов, которые являются сложными структурами с самоподобием на различных масштабах. Основными аспектами фрактального анализа является фрактальная размерность (D) и самоподобие. Показатель Хёрста (также известный как Hurst exponent) – это численный показатель, используемый для измерения степени самоподобия или долгосрочной зависимости во временных рядах. Обозначается буквой « H » и может принимать значения от 0 до 1. Значение $H = 0,5$ соответствует случайному блужданию (броуновскому движению), $H < 0,5$ – отрицательной корреляции, а $H > 0,5$ – положительной корреляции. Чем ближе H к 1, тем сильнее долгосрочная зависимость. Обобщенный показатель Хёрста широко используется в различных областях, таких как финансы, климатология, биология и анализ временных рядов, для определения характера динамики данных и прогнозирования будущих значений. Он позволяет выявить и оценить степень структурированности или случайности в данных временных рядов. Показатель Хёрста и фрактальная размерность являются концепциями, связанными с анализом самоподобия и фрактальности в данных, но они измеряют разные аспекты этой фрактальной структуры.

Показатель Хёрста измеряет степень долгосрочной зависимости или корреляции во временном ряде. Высокие значения H могут свидетельствовать о устойчивом тренде, тогда как низкие значения H могут указывать на менее предсказуемое и хаотичное поведение. Фрактальная размерность измеряет степень фрактальности или самоподобия в структуре данных. Фрактальная размерность может быть дробной (например, 1,5), что указывает на фрактальную структуру, которая заполняет пространство промежуточным образом между

целыми числами (например, одномерная прямая имеет размерность 1, а двумерный квадрат – 2). Высокие значения фрактальной размерности могут указывать на сложные, нерегулярные структуры. Таким образом, хотя оба показателя могут использоваться для оценки структуры данных, они измеряют разные характеристики. Показатель Хёрста фокусируется на временной зависимости, в то время как фрактальная размерность измеряет самоподобие или фрактальность в пространственной структуре данных. В некоторых случаях эти концепции могут быть использованы вместе для более полного анализа.

Для определения показателя Херста H или фрактальной размерности D по анализируемым данным можно применять различные методы [14]. Примерами методов, которые напрямую оценивают D профиля временного ряда, являются алгоритм Каца [15] или метод Хигучи (HG) [16]. Существует большой класс методов, которые фокусируются на долгосрочных корреляциях (H), следовательно, на оценке H). Например, метод Берри, заключающийся в использовании спектрального анализа мощности (PSA) и существование степенного закона поведения со спектральным показателем β позволяют определить фрактальную размерность, используя соотношение

$$H = 2 - DF = (\beta \pm 1)/2, [12].$$

Другие методы, предложенные для оценки H , включают: анализ интервала Херста с перемасштабированием (R/S) [17], анализ с перемасштабированием RRA [18], флуктуационный анализ без тренда (DFA) [19]. В данном исследовании применен метод Хигучи для оценки фрактальной размерности, спектральная плотность мощности (PSD).

На рисунке 1 представлена изменчивость фрактальной размерности, полученная методом Хигучи, для 6 февраля 2023 г. (Землетрясение в Турции и Сирии) Реализация представлена для компоненты Y магнитного поля земли для разных геомагнитных обсерваторий, находящихся на разном удалении от эпицентра землетрясения. Кривые показывают распределение вклада всех источников возмущений в компонентах магнитного поля. Особый интерес представляет наличие явно выраженной впадины на кривой, соответствующий моменту начала первого мощного толчка – 1:17:35 UT.

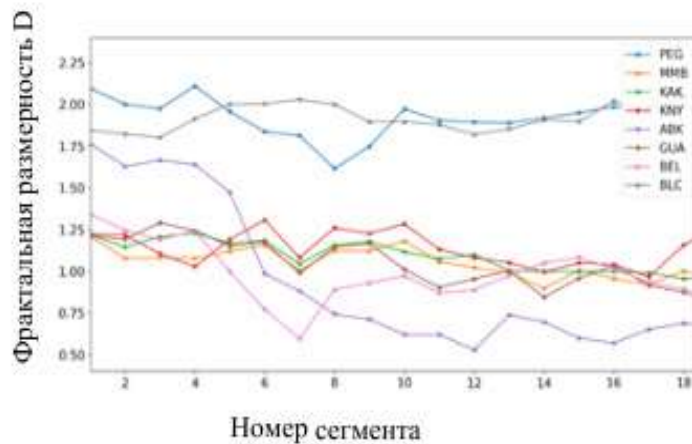


Рисунок 1 – Изменчивость фрактальной размерности, полученная методом Берри, для 6 февраля 2023 г. (Землетрясение в Турции и Сирии)

Для построения этих графиков исходные данные были очищены от выбросов, затем разделены на сегменты длиной 256 с 50% перекрытием, для каждого из сегментов рассчитаны спектральная мощность плотности (PSD), затем наклон β спектра оценивается с помощью линейной аппроксимации спектра, построенного в логарифмическом масштабе. На рисунке 2 представлена изменчивость фрактальной размерности, полученная методом Хигучи, для сегментов длиной 1024. В обоих случаях наблюдается отклик фрактальной размерности в тот же момент времени, когда происходит землетрясение.

В данной реализации приведено изменение фрактальной размерности одного дня 6 февраля 2023 г. для 8 геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET, причем геомагнитная обсерватория Педели (PEG) является ближайшей работающей в тот день обсерваторией. По этой причине на графике изменчивости фрактальной размерности виден отклик, соответствующий моменту начала землетрясения.

Поэтому отклик виден только на графике изменчивости фрактальной размерности только на обсерватории PEG. Остальные графики приведены для сравнения: мы видим схожее поведение изменчивости фрактальной размерности для

остальных обсерваторий, что говорит о том, что источником возмущения во всех обсерваториях на тот момент является один источник, а поведение фрактальной размерности PEG вызвано, скорее всего, произошедшим в тот момент землетрясением.

На рисунке 3а представлены графики изменчивости фрактальной размерности для 25 февраля 2023 г. для землетрясения произошедшего на юго-востоке японского острова Хоккайдо. Для исследования выбраны 5 геомагнитных обсерваторий – Мемамбетсу (ММВ), Какиока (КАК), Бельск (BEL), Педели (PEG), Абиско (АВК). Как мы видим из рисунка, на графике изменчивости фрактальной размерности для геомагнитной обсерватории ММВ (Мемамбетсу), находящейся в 150 км от эпицентра землетрясения наблюдается возрастание показателя спектральной плотности мощности, соответствующий моменту времени 13:28:20, хотя землетрясение произошло 13:27:43. Это свидетельствует о том, что отклик землетрясения в вариациях компонент магнитного поля Земли произошел за время распространения сейсмической волны от эпицентра до геомагнитной обсерватории.

Причем в реализации вариаций компонент магнитного поля Земли наблюдается характерные возмущения, представленные на Рисунке 3б.

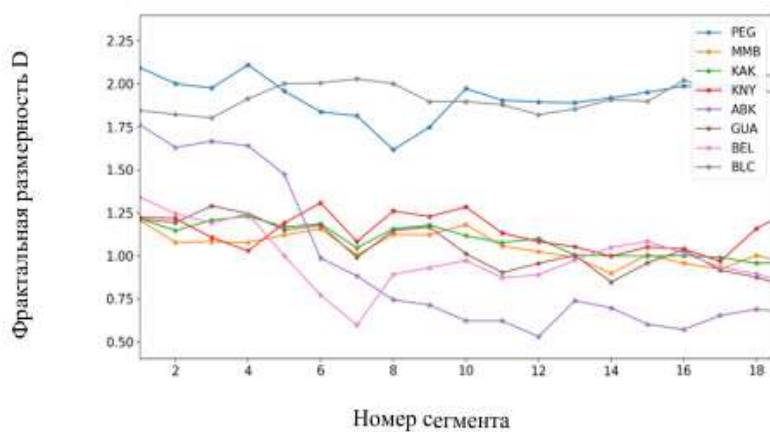


Рисунок 2 – Изменчивость фрактальной размерности, полученная методом Хигучи, для 6 февраля 2023 г. (Землетрясение в Турции и Сирии)

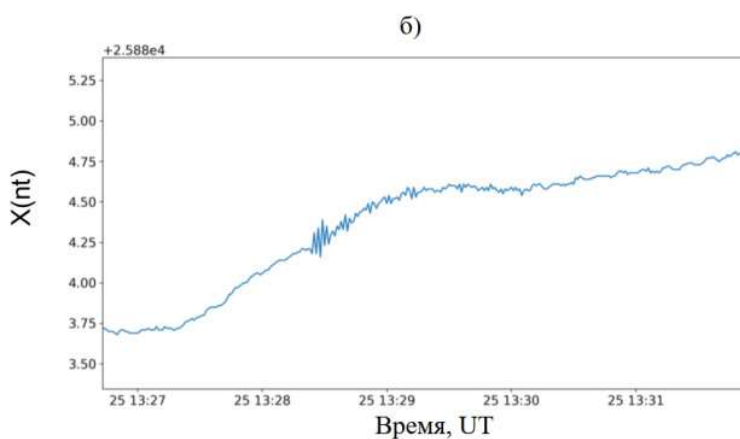
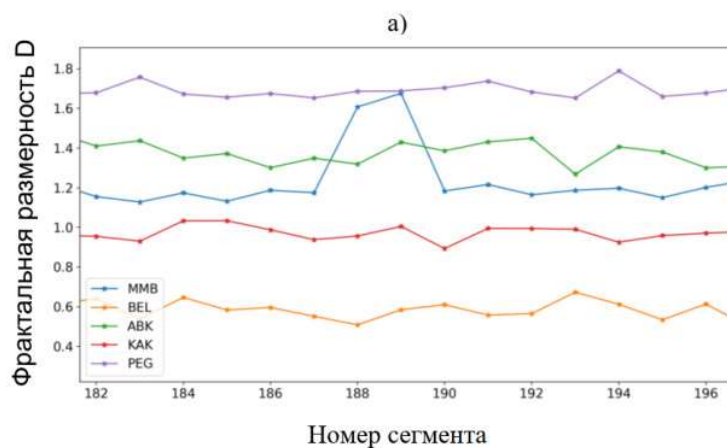


Рисунок 3 – Результат применения фрактального анализа к данным горизонтальной компоненты магнитного поля Земли а) изменение фрактальной размерности в течении одного дня 25 февраля 2023 г., б) график изменения горизонтальной компоненты магнитного поля Земли

Заключение

Анализ временных рядов геомагнитных данных с применением методов фрактального анализа позволил выделить фрактальные закономерности в изменениях компонент геомагнитного поля. Вероятно, в данном случае возмущение магнитного поля может быть обусловлено либо магнитными пульсациями земного происхождения, либо нарушениями в ионосфере Земли в эпицентральной зоне очага землетрясения. Эти нарушения могли вызвать дестабилизацию глобальных токовых систем. В качестве механизма

воздействия землетрясения на ионосферу можно рассматривать изменение концентрации электронов под воздействием акустико-гравитационных волн, генерируемых на земной поверхности в период активности геодинамических процессов, как например, непосредственно перед, во время и сразу после землетрясения. Представленные результаты подчеркивают важность дальнейших исследований в этой области, включая расширение объема данных, использование более точных методов анализа и углубленное изучение механизмов взаимодействия между геомагнитными явлениями и сейсмической активностью.

Литература

1. Hayakawa M. Earthquake Prediction with Radio Techniques – John Wiley and Sons: Singapore, 2015. – 294 p.
2. Kopytenko Y.A.; Matiashvily T.G.; Voronov P.M.; Kopytenko E.A.; Molchanov O.A. Detection of ULF emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardziya observatories // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 1990. – Vol. 77. – P. 85-95.
3. Molchanov O.A.; Kopytenko Y.A.; Voronov P.M.; Kopytenko E.A.; Matiashvily T.G., Fraser-Smith A.C., Bernardi, A. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenters of the Spitac ($M_s = 6.9$) and Loma Prieta ($M_s = 7.1$) earthquakes: Comparative analysis // *Geophys. Res. Lett.* – 1992. – Vol. 19. – P. 1495-1498.
4. Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., Ladd M.E., Helliwell R.A., Villard O.G. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // *J. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 17. – P. 1465-1468.
5. Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O.A., Yumoto K. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993 // *Geophys. Res. Lett.* – 1996. – Vol. 23. – P. 241-244.
6. Hayakawa M., Molchanov O.A., Ondoh, T., Kawai E. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals – *J. Comm. Res. Lab.* – 1996. – Vol. 43. – P. 169–180.
7. Pulnits S.A., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes – Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2004. – 315 p.
8. Molchanov O.A., Hayakawa M. Seismo Electromagnetics and Related Phenomena: History and Latest Results – TERRA-PUB: Tokyo, Japan, 2008. – 189 p.
9. Surkov V., Hayakawa M. Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields – Springer: Tokyo, Japan, 2014. – 486p.
10. Sorokin V.V., Chmyrev V., Hayakawa M. Electrodynamical Coupling of Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere of the Earth. – NOVA Science Pub. Inc.: New York, USA, 2015. – 355p.
11. Ouzounov D., Pulnits S., Hattori K., Taylor P. (Eds.) Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies – AGU Geophysical Monograph 234, Wiley: New York, USA., 2018. – 365 p.
12. Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. – W.H. Freeman: New York, NY, USA, 1983.
13. Barnsley M.F. Fractals Everywhere, 2nd ed.; Academic Press Professional: Boston, MA, USA, 1993.
14. Klinkenberg B. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear // features. *Math. Geol.* – 1994. – Vol.26, – P.23–46.
15. Katz M.J. Fractals and the analysis of waveforms // *Comput. Biol. Med.* – 1988. Vol. 18. – P.145-156.
16. Higuchi, T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory // *Phys. D Nonlinear Phenom.* – 1988. – Vol. 31. – P. 277-283.
17. Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs // *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* – 1951. – Vol. 116. – P. 770-799.
18. Peng C.K., Buldyrev S.V., Goldberger A.L., Havlin S., Sciortino F., Simons M., Stanley H.E. Long-range correlations in nucleotide sequences // *Nature.* – 1992. – Vol. 356. – P.168
19. Peng C.K., Buldyrev S.V., Havlin S., Simons M., Stanley H.E., Goldberger A.L. Mosaic organization of DNA nucleotides // *Phys. Rev. E.* – 1994. – Vol. 49. – P. 1685.