

**ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ,
РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ТЕРРИТОРИИ БИШКЕКСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО
ПОЛИГОНА**

**БИШКЕК ГЕОДИНАМИКАЛЫК ПОЛИГОНУНУН АЙМАГЫНДА
РЕГИСТРАЦИЯЛАНГАН ГЕОАКУСТИКАЛЫК СИГНАЛДАРДЫН ФРАКТАЛДЫК
АНАЛИЗИ**

Имашев Санжар Абылбекович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаборатории моделирования энергонасыщенных сред, Научная Станция РАН в г. Бишкек, 720049, Кыргызстан, e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

Чешев Михаил Евгеньевич, младший научный сотрудник Лаборатории моделирования энергонасыщенных сред, Научная Станция РАН в г. Бишкек, 720049, Кыргызстан, e-mail: cheshevmi hail@yandex.ru

Аннотация. В рамках специальных экспериментов, проводимых в 2008–2012 гг. на территории Бишкекского геодинамического полигона осуществлялась регистрация геоакустических откликов горных пород в естественных условиях на воздействие электрических импульсов электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2. Результаты показали, что в случае размещения геофонов в скважинах, отклики геоакустической эмиссии регистрировались при малых напряженностях воздействующего электрического поля порядка 0.5 мВ/м и представляли собой короткие импульсные высокоамплитудные сигналы, превышающие среднеквадратичный уровень шума более чем в 3 раза. В данной работе приведены результаты анализа геоакустических сигналов стационарного пункта регистрации, в условиях, когда отклики не выделяются на уровне шума. Эта особенность диктует применение фрактальных методов, позволяющих извлекать дополнительную информацию из сигналов, в которых амплитуда полезной составляющей соизмерима с уровнем шума. В качестве метода расчета фрактальных характеристик (параметра Херста) использовался метод анализа флуктуаций после исключения масштабнo-зависимых трендов (DFA). Расчет параметра Херста в скользящем окне показал, что резкое уменьшение параметра Херста совпадает по времени с пусками ЭРГУ-600-2. В фоновые же периоды (в отсутствие электромагнитных воздействий), значения параметра Херста колеблются на уровне ~ 0.5 , свидетельствуя об отсутствии в сигнале в этот период коррелированности (классическое броуновское движение). Обнаруженные отклики геоакустической эмиссии на зондирующие импульсы подтверждают возможность влияния импульсов тока на процесс деструкции геосреды, что согласуется с результатами, полученными другими исследователями в данной области.

Ключевые слова: фрактальный анализ, геоакустический сигнал, параметр Херста, спектр сингулярности, метод DFA

**FRactal ANALYSIS OF GEOAcoustic SIGNALS REGISTERED AT BISHKEK
GEODYNAMIC POLYGON**

Imashev Sanjar Abylbekovich, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Senior Researcher of Laboratory of Energy-Saturated Media Simulation, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, 720049, Kyrgyzstan, email: sanzhar.imashev@gmail.com

Cheshev Mikhail Evgenevich, Junior Researcher of Laboratory of Energy-Saturated Media Simulation, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, 720049, Kyrgyzstan, email: cheshev Mikhail@yandex.ru

Abstract. During the special experiments conducted in 2008–2012 at the territory of the Bishkek geodynamic polygon, geoacoustic responses of rocks under natural conditions to electrical impulses of electrical prospecting generator ERGU-600-2 were recorded. The results showed that when geophones were placed in wells, the responses of geoacoustic emissions were recorded at low intensities of electric field ~ 0.5 mV/m and appeared as short pulse high-amplitude signals exceeding the root mean square noise more than 3 times. This paper presents the results of analysis of geoacoustic signals at stationary measuring site, under conditions where responses are not distinguished from the noise level. This feature dictates using of fractal methods that make it possible to extract additional information from signals in which the amplitude of useful component is commensurable with the noise level. We used Detrended Fluctuation Analysis (DFA) as the method for estimation of fractal characteristics (Hurst exponent). Calculation of Hurst exponent in a sliding window showed that a sharp decrease in Hurst exponent values coincides in time with the running of ERGU-600-2. In the background periods (in the absence of electromagnetic impact), values of Hurst exponent fluctuate at a level of ~ 0.5 , indicating the absence of correlation in the signal during this period (classical Brownian motion). The detected responses of geoacoustic emission to the sensing pulses confirm the possibility of current pulses impact on the process of geomedia destruction, which is consistent with the results obtained by other researchers in this field.

Keywords: fractal analysis, geoacoustic signal, Hurst exponent, singularity spectrum, DFA method

Введение. Изменения в сейсмической активности (суточного числа сейсмических событий) на территории Гармского и Бишкекского полигонов после пусков геофизических МГД-генераторов зафиксировали влияние мощных электроимпульсов на процессы деформации в земной коре [1]. В последующих работах [2, 3] было показано, что аналогичный эффект имеет место и при глубинных зондированиях с использованием электроимпульсного источника (установки ЭРГУ-600-2). Во всех случаях наблюдались устойчивые корреляции между кратковременным приростом сейсмической активности и электровоздействиями на земную кору однополярными импульсами тока с достаточно большим вкладом энергии в геосреду.

В 2008–2012 гг. на территории Бишкекского геодинамического полигона были организованы специальные эксперименты, в рамках которых осуществлялась регистрация геоакустических откликов горных пород в естественных условиях на воздействие электрических импульсов, вырабатываемых электрогенераторной установкой ЭРГУ-600-2 [4, 5]. Эти результаты показали, что отклики геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания в случае размещения геофонов в скважинах могут надежно регистрироваться уже при уровне напряженности воздействующего электрического поля порядка 0.5 мВ/м. Наблюдаемые отклики представляли собой короткие импульсные сигналы большой амплитуды, схожие по виду огибающей с сейсмическими сигналами, регистрируемые измерительными станциями сети KNET. Выделение данных импульсов на фоне непрерывного шума производилось на основе факта превышения порога равного 3σ (σ – уровень среднеквадратичного шума).

В настоящее время регистрация сигналов геоакустической эмиссии на Научной Станции РАН, производится в непрерывном режиме с помощью стационарного трехкомпонентного пьезокерамического сейсмоприемника (геофона), расположенного на выходе коренных пород на глубине 3м. При этом, по сравнению с сигналами, полученными в скважинах, геоакустические отклики в стационарной точке не выделяются в явном виде на

уровне шума, вследствие чего, необходимо использовать иные методы обработки подобных сигналов, в которых амплитуда полезной составляющей соизмерима с уровнем шума. В данной работе приводятся результаты анализа сигналов геоакустической эмиссии на основе фрактальных методов, в частности метода анализа флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов (Detrended Fluctuation Analysis (DFA)) для выделения периодов отклика геосреды на импульсы ЭРГУ-600-2.

Методика. Электроразведочная генераторная установка ЭРГУ-600-2 используется для глубинного электроразведывания земной коры территории Бишкекского геодинамического полигона для задач мониторинга кажущегося сопротивления [6]. Нагрузкой установки является диполь-излучатель, расположенный в центральной части полигона, ориентированный в направлении север – юг. Диполь выполнен в виде закопанного на глубине 1 м изолированного алюминиевого кабеля общим сечением 1200 мм². Расстояние между полюсами 4028 м. Зондирующий импульс ЭРГУ-600-2 представляет собой серию периодических знакопеременных импульсов тока прямоугольной формы с амплитудой 600А, длительностью 5 с и периодом повторения 10 с. Длительность сеанса составляет 12 минут. Ежедневно проводится шесть таких сеансов, кроме выходных и праздничных дней.

Как уже упоминалось ранее, мониторинг геоакустической эмиссии производится в непрерывном режиме на стационарной точке с помощью геофона А1638 производства ЗАО “Геоакустика” [7] с частотой 1 кГц. На рис.1 представлены фотоснимки: а) верхней площадки Научной Станции РАН с обозначением местоположения подземного пункта мониторинга, б) - входа в него, в) - трехкомпонентного пьезокерамического датчика А1638.



Рис. 1. Местоположение подземного пункта мониторинга геоакустических сигналов на верхней площадке Научной Станции РАН (обозначено стрелкой) (а), вход в него (б), геофон А1638 (в)

Типичный вид записи геоакустического сигнала представлен на рис.2 (начало записи, 2019-01-08 07:08:21, Y канал) и представляет собой набор нестационарных компонент различной амплитуды и частоты. Штатный режим пусков ЭРГУ-600-2 (6 сеансов по 12 минут)

подсвечен желтыми полосами. Для расчетных целей была проведена децимация частоты до 100 Гц.

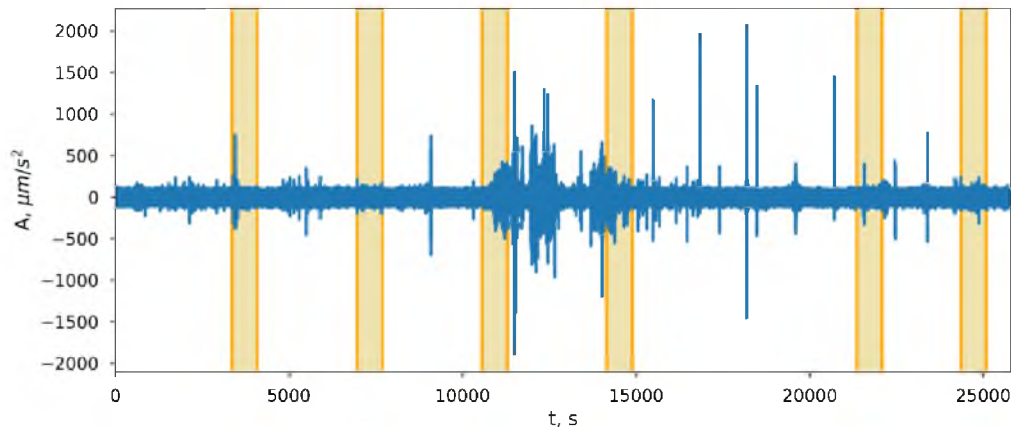


Рис. 2. Запись сигнала геоакустической эмиссии (Y компонента, начало записи, 2019-01-08 07:08:21). Желтыми полосами отмечены сеансы пусков ЭРГУ-600-2

На рисунке видно, что в сигнале на фоне шумов в явном виде выделяются высокоамплитудные низкочастотные и высокочастотные (импульсные) компоненты не связанные с зондированием ЭРГУ-600-2. Для наглядности, на рисунке 3 показан участок сигнала, записанный во время последних двух сеансов работы электрзондирующей установки.

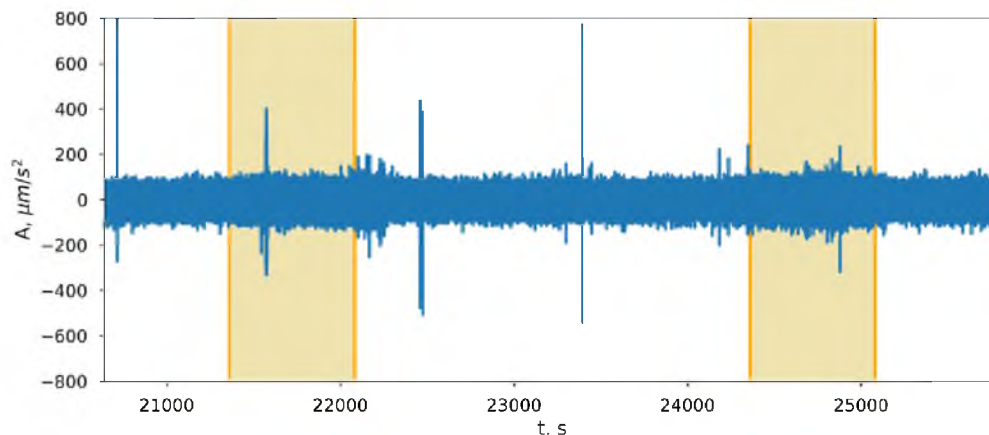


Рис. 3. Участок геоакустического сигнала. Желтыми полосами отмечены последние два сеанса работы ЭРГУ-600-2

Как видно из рисунков, геоакустический отклик на сеансы зондирований не проявляется визуально, вследствие малой амплитуды по сравнению с фоновым шумом. Однако, тот факт, что геоакустический сигнал, представляющий собой временной ряд, содержит как шумовую компоненту, так и саму волновую форму, хоть и не явно выделяющуюся, дает основание применять методы фрактального анализа, широко используемые при исследовании схожих временных рядов, например сейсмических сигналов [8, 9]. При этом используется основное преимущество фрактального анализа – способность исследовать сигналы, которые, с точки зрения классических методов ковариационной и спектральной теорий, не содержат какой-либо полезной информации и являются «шумом» [10, 9]. Для описания фрактальных свойств геоакустического сигнала часто используется так называемый параметр Херста H [11], который связан с фрактальной размерностью D простым соотношением:

Наиболее популярными методами расчета данного параметра являются: метод нормированного размаха, метод анализа флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов и различные методы, использующие аппарат дискретного или непрерывного вейвлет-преобразования [12]. В качестве метода оценки параметра Херста был использован метод анализа флуктуаций после исключения масштабно-зависимых трендов (DFA) [13, 14], дополненный алгоритмом выбора диапазонов, основанного на собственных делителях [15].

Для выявления моментов перехода геоакустического шума из режима фрактального гауссовского, который соответствует классическому броуновскому движению ($H \sim 0.5$) в более структурированное состояние, необходимо рассчитать значения параметра Херста в скользящем окне [10, 9]. Ширина окна равняется 10 секунд, что является достаточным для регистрации сеанса зондирования с общей длительностью в 12 минут.

Результаты и обсуждение. На рис.4 представлена динамика изменений параметра Херста геоакустического сигнала, рассчитанная в скользящем окне шириной 10 сек методом DFA. Здесь, как и в предыдущих рисунках, желтые полосы обозначают сеансы электроразондирования. Так как сами вариации имеют сильно осциллирующий характер, то для большей наглядности было решено сгладить кривую скользящим средним (утолщенная синяя кривая).

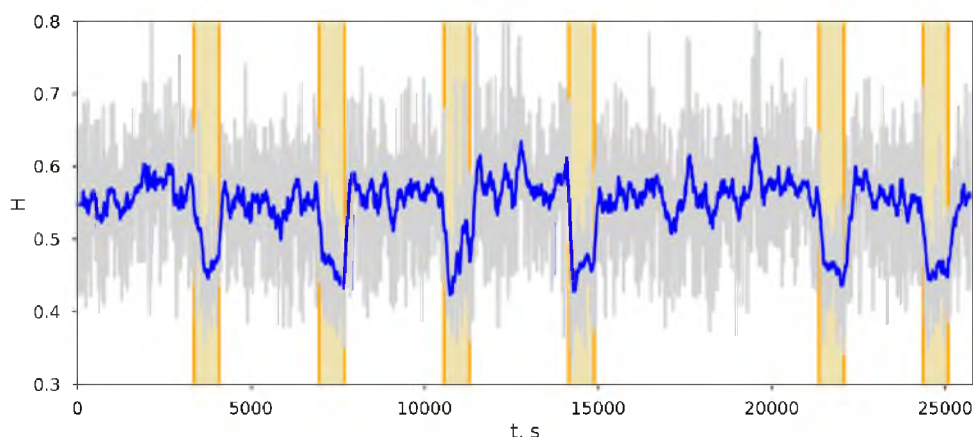


Рис. 4. Вариации параметра Херста геоакустического сигнала (утолщенная синяя кривая – сглаживание скользящим средним; желтые полосы – сеансы работы ЭРГУ-600-2)

Как видно из рисунка, параметр Херста геоакустического сигнала вне сеансов электроразондирования остается постоянным на уровне ~ 0.5 , что свидетельствует о случайном характере шумовых компонент на этом участке, соответствующих классическому броуновскому движению. В моменты же работы установки ЭРГУ-600-2, значения параметра Херста падают до уровня $\sim 0.4-0.45$, что свидетельствует о наличии компоненты, которая вносит элемент детерминированности в сам сигнал.

На рис.5 показан участок вариаций параметра Херста, включающий два последних сеанса работы электроразондирующей установки.

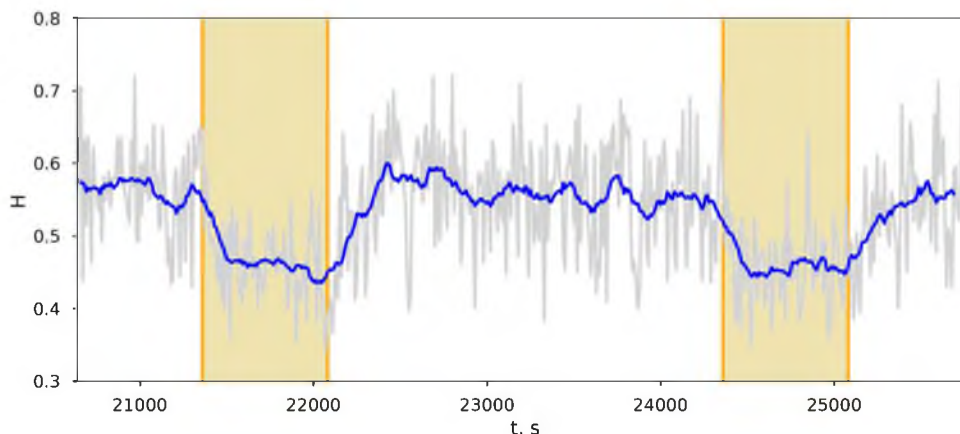


Рис. 5. Вариации параметра Херста геоакустического сигнала в период последних двух сеансов работы ЭРГУ-600-2 (желтые полосы) (утолщенная синяя кривая – сглаживание скользящим средним)

Из рисунка следует, что уменьшение параметра Херста, равно как и его последующее повышение происходит сравнительно медленно, принимая во внимание, что ширина окна расчета самого параметра равна 10 секундам, а длительность зондирующего импульса – 12 минутам. Подобная задержка проявлялась в экспериментах по регистрации геоакустической эмиссии в скважинах [5] и в лабораторных экспериментах на нагруженных образцах геоматериалов [16].

Выводы. Геоакустический сигнал, регистрируемый в стационарной точке на территории Научной Станции РАН, представляет собой набор нестационарных компонент различной амплитуды и частоты, в которых визуально не выделяются моменты пусков ЭРГУ-600-2. Выделение геоакустических откликов на зондирующие импульсы затруднено тем, что интересующие компоненты малы по амплитуде и соизмеримы с уровнем фонового шума, в отличие от экспериментов по регистрации геоакустической эмиссии в скважинах [Закупин, 2014, 2011], когда амплитуда сигнала превышала среднеквадратичный уровень шума (σ) более чем в 3 раза. Эта особенность сигналов геоакустической эмиссии диктует применение методов фрактального анализа, которые позволяют выявлять дополнительную информацию из временных рядов, содержащих шумовую компоненту, доминирующую на рассматриваемом участке [8-12].

Расчет параметра Херста в скользящем окне методом DFA показал, что падение значений параметра до уровня ~ 0.45 совпадает по времени с сеансами работы установки ЭРГУ-600-2. В фоновые же периоды, когда электромагнитных воздействий не было, значения параметра Херста варьируются на фоновом уровне ~ 0.5 , свидетельствуя об отсутствии в сигнале в этот период коррелированности, как в случае с классическим броуновским движением [12, 10]. Обнаруженные отклики геоакустической эмиссии подтверждают возможность влияния импульсов тока на процесс деструкции геосреды, что согласуется с результатами, изложенными в работах [17, 2], а также в работе [18] о стимулировании локальной сейсмичности территории Северного Тянь-Шаня зондированиями ЭРГУ-600-2 в период после 2006 г. (проводимых в режиме биполярных импульсов).

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9)

Список литературы

1. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. 4–5. С. 152–160.

2. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинимического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. Адушкина В.В., Кочаряна Г.Г. Ин-т динамики геосфер РАН: М.: ГЕОС, 2010. 316–326.
3. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. 2012. 7–8. С. 63–88.
4. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Гаврилов В.А. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // Физика Земли. 2011. № 11. С. 63–74.
5. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Мубассарова В.А., Ильичев П. В. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинимическом полигоне // Физика Земли. 2014. № 5. С. 105–120.
6. Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. Проявления геодинимических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.
7. Geoacoustics. Piezoelectric geophones A16XX and A05XX [Электронный ресурс]. URL: http://geophone.narod.ru/PDF/Geophones_AXXXX.pdf (дата обращения: 27.05.2019).
8. Сычев В.Н., Имашев С. А. Оценка параметра Херста сейсмического сигнала // Геосистемы переходных зон. 2017. № 2. С. 50–61.
9. Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. 2009. № 5. С. 15–28.
10. Имашев С.А., Сычев В.Н. Оценка возможностей применения методов фрактального анализа для исследования геофизических данных. Часть 2. Фрактальный анализ сейсмосигнала // Вестник КРСУ. 2017. 17. № 5. С. 78–82.
11. Hurst H. E., Black R. P., Simaika Y. M. Long-term storage: An experimental study // London: Constable, 1965. 145 p.
12. Seuront L. Fractals and multifractals in ecology and aquatic science // London: Taylor & Francis, 2010. 360 p.
13. Kantelhardt J. W., Koscielny-Bunde E., Rego H. H.A., Havlin S., Bunde A. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2001. 295. 3-4. P. 441–454.
14. Peng C.-K., Buldyrev S. V., Havlin S., Simons M., Stanley H. E., Goldberger A. L. Mosaic organization of DNA nucleotides // Physical Review E. 1994. 49. N 2. P. 1685–1689.
15. Чешев М.Е., Сычев В.Н., Имашев С.А. Алгоритм оптимального выбора диапазонов временного ряда для задач фрактального анализа // Геосистемы переходных зон. 2018. 2. № 2. С. 125–130.
16. Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С. 43–50.
17. Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности. Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2011. 408 с.
18. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Фроунд Ф.Т. Изменение физических свойств коры под влиянием сильных электромагнитных полей // Триггерные эффекты в геосистемах. Тез. докл. 2го Всероссийского семинара-совещания. М.: ИДГ РАН. 2013. С. 100–101.