УДК 519.246.8:550.344

Научная статья

К вопросу анализа сигналов сейсмоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород на Камчатке

В. Н. Сычев¹, М. Е. Чешев¹, М. А. Мищенко²

¹ Научная станция РАН, 720049, Кыргызстан, Бишкек-49

² Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Россия, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: micle@ikir.ru

На Камчатке в пункте наблюдений “Карымшина” при помощи измерительной системы на основе трехкомпонентного пьезокерамического сейсмоприемника проводится мониторинг сигналов сейсмоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород. На выходе измерительной системы регистрируется колебательное ускорение в частотном диапазоне 0.5–400 Гц. Анализ проводится на основе записей сейсмоакустических сигналов от группы региональных землетрясений 2019 года с энергетическим классом $K_s > 10.0$. Функция распределения плотности вероятностей такого сигнала не всегда описывается нормальным законом распределения, поэтому для исследования подобных стохастических временных рядов подходят методы статистической физики, в рамках которых рассматриваются свойства автомодельности этих сигналов.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, спектр мощности сигнала, угол наклона спектра

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-150-158

Поступила в редакцию: 22.10.2020

В окончательном варианте: 05.02.2021

Для цитирования. Сычев В. Н., Чешев М. Е., Мищенко М. А. К вопросу анализа сигналов сейсмоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 34. № 1. С. 150-158. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-150-158

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Сычев В. Н., Чешев М. Е., Мищенко М. А., 2021

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

Мониторинг сигналов сейсмоакустической эмиссии проводился в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН по теме «Динамика физических процессов в активных зонах ближнего космоса и геосфер» (2018-2020) государственной регистрации (тема № АААА-А17-117080110043-4).

Введение

Ранее в работах [1]-[3] уже проводился анализ записей сейсмоакустической эмиссии зарегистрированной сейсмоприемником, установленным в пункте комплексных геофизических наблюдений ИКИР ДВО РАН “Карымшина” на Камчатке. При помощи статистических методов выявлено самоподобие структуры сейсмоакустического сигнала, обнаружено свойство автомодельности записей сигналов землетрясений, как свидетельство дальних корреляций и получена оценка их масштабов. Установлено, что в пункте “Карымшина” регистрируется сейсмоакустический отклик приповерхностных осадочных пород на масштабах от первых десятков метров [3]. В данной работе продолжен анализ свойств геоакустических записей сейсмических событий, проанализирован спектр мощности сигнала на протяжении всей записи события.

Методика наблюдений

Сейсмоакустические сигналы регистрируются на Камчатке в пункте комплексных геофизических наблюдений “Карымшина” (52.83° N, 158.13° E), который расположен в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки в зоне пересечения разноранговых тектонических разломов [3]. По результатам буровых и строительных работ приповерхностные породы в пункте наблюдений являются осадочными с толщиной слоя примерно 50 м и имеют фрагментарный состав [4, 5].

Для регистрации сейсмоакустических сигналов используется измерительный комплекс, который разработан и изготовлен в ИС РАН [6]. В качестве датчика сигналов используется трехкомпонентный пьезокерамический сейсмоприемник А-1638 производства ЗАО “Геоакустика” [7]. Измерительный комплекс регистрирует три ортогональных компоненты вектора колебательного ускорения в частотном диапазоне 0.5–400 Гц с частотой дискретизации 1 кГц. Комплекс установлен на поверхности земли, а сейсмоприемник закреплен сверху на опоре обсадной трубы сухой пятиметровой скважины [3].

Теория Колмогорова

В 1941 году А.Н. Колмогоров предложил две гипотезы [8], которые стали фундаментом для дальнейших исследований в области турбулентности. Первая гипотеза говорит о том, что статистические свойства распределения F_n изотропной турбулентности локального масштаба L определяются скоростью диссипации энергии ϵ , кинематической вязкостью ν и самим масштабом L . Вторая гипотеза основывается на том, что диссипация энергии турбулентности универсальна на всем спектре для заданного течения, то есть энергетический спектр будет зависеть только от величин ϵ и L [9]. Так как масштаб связан с волновым числом k , можно получить:

$$E(k) = C\epsilon^{2/3}k^{-5/3}, \quad (1)$$

Формулу (1) называют законом Колмогорова, а входящий в нее множитель C — константой Колмогорова. Чтобы увидеть степенную зависимость, нужно построить соотношение (1) в логарифмических координатах (рис. 1).

Рис. 1. Степенная зависимость закона Колмогорова. k_L — граница макромасштаба, k_λ — граница микромасштаба.

На рис. 1 видно, что график имеет прямой участок, лежащий между масштабами L и λ , наклон которого соответствует показателю степени в формуле (1). Поскольку поступление энергии в поток происходит на макромасштабе k_L , а ее дальнейшая диссипация начинается на микромасштабах, т.е. между ними есть некоторый инерционный интервал, в котором происходят основные процессы турбулентности. Соответственно, наличие прямого участка спектра говорит о наличии развитой турбулентности у исследуемого потока. Подобный подход широко применяется к исследованию характеристик солнечного ветра [10, 11].

Анализируемые данные

Для анализа использовались фрагменты сейсмоакустических записей 18 камчатских землетрясений, зарегистрированных в пункте наблюдений “Карымшина” в период с 03.01.2019 по 11.10.2019. Длительность каждого фрагмента – 5 минут, с началом за 2 минуты до прихода P -волны и окончанием – 3 минуты после него.

Данные по землетрясениям (дата, время, широта, долгота, глубина, класс), представленные в табл. 1, были получены из регионального сейсмического каталога (Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.), <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>). Карта района наблюдений с эпицентрами землетрясений представлена на рис. 2.

Рис. 2. Карта района наблюдений. Треугольник – пункт наблюдений “Карымшина”, красные звездочки – эпицентры землетрясений.

На рис. 3 представлена типичная форма сейсмического сигнала от землетрясения (таблица, № 1).

Рис. 3. Фрагмент записи сейсмического сигнала от землетрясения 2019.01.03 (табл. 1, № 1), зарегистрированного сейсмоприемником в пункте наблюдений “Карымшина”.

На рис. 4 представлена функция распределения плотности вероятностей для сейсмического события 2019.01.03 на рис. 3 и ее аппроксимация функцией нормального распределения. Для построения функции распределения плотности вероятностей в качестве параметра выбрана флуктуация безразмерной величины: $(P - \langle P \rangle) / \sigma_P$, где скобки $\langle \rangle$ означают осреднение по времени, $\sigma_P = (P^2 - \langle P \rangle^2)^{1/2}$ – среднеквадратичное отклонение.

Рис. 4. Функция распределения плотности вероятностей и функция нормального распределения для фрагмента записи сейсмического сигнала от землетрясения на рис. 3.

Таблица

Характеристики землетрясений

№	Землетрясение		Эпицентр, координаты		Глубина, км	Класс	R, км	tg α
	Дата, UTC	Время, UTC	Шир.° N	Долг.° E				
1	2019.01.03	17:57:43.5	53.14	160.05	58	12.2	134	-0.402
2	2019.01.12	11:18:58.4	52.79	159.80	60	12.4	112	-0.358
3	2019.01.19	19:15:53.0	52.71	159.55	56	10.0	96	-0.254
4	2019.02.08	17:08:35.2	52.42	159.05	59	12.0	77	-0.580
5	2019.02.14	18:24:27.6	52.39	159.13	58	11.2	83	-0.510
6	2019.03.28	22:06:48.1	50.51	160.07	49	14.0	290	-0.345
7	2019.03.31	15:25:34.6	51.94	159.48	41	10.5	134	-0.188
8	2019.04.16	15:22:50.8	53.69	160.94	55	12.1	210	-0.162
9	2019.07.18	12:45:38.6	52.43	159.99	51	11.8	133	-0.365
10	2019.07.28	09:53:04.0	53.70	160.88	52	11.5	207	-0.096
11	2019.07.31	12:56:36.9	52.36	159.81	47	11.1	125	-0.245
12	2019.09.06	08:49:23.6	52.80	159.90	50	10.5	119	-0.244
13	2019.09.23	21:54:55.9	52.01	159.93	21	11.8	152	-0.305
14	2019.09.23	23:20:33.0	52.05	159.86	18	10.7	145	-0.197
15	2019.10.05	16:18:36.6	51.69	158.89	63	11.4	136	-0.373
16	2019.10.08	18:58:31.3	52.35	159.73	41	10.8	120	-0.320
17	2019.10.08	19:01:48.7	52.37	159.62	46	10.2	112	-0.177
18	2019.10.11	19:12:27.6	52.91	160.03	53	10.9	128	-0.292

Как видно, Гауссова функция $f(x)exp(x^2/\sigma^2)$, где σ – стандартное отклонение исследуемых данных, не описывает форму экспериментальной функции распределения. Поэтому для исследования наблюдаемого сигнала сейсмоакустической эмиссии, который сопровождает процесс разрушения при землетрясении, потребуются уже другие законы распределения, способные описывать случайные процессы с памятью и дальними корреляциями.

Результаты и обсуждение

Для анализа данных сигналов воспользуемся моделью Колмогорова, тангенс угла наклона спектра которой равен $-5/3$. Построим спектр мощности для фрагмента записи сейсмического сигнала от землетрясения 2019.01.13 (таблица, № 1) на отрезке 120–163 с. Для этого проведем быстрое преобразование Фурье на данном участке, с оконной фильтрацией Хэмминга. Классическая форма спектра мощности и аппроксимация линейных участков приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, спектр делится на три участка, которые были аппроксимированы прямыми. Углы наклона данных участков соответственно равны -0.65 , -0.47 , -1.05 . Ранее в [12] на примере спектров флуктуаций межпланетного магнитного поля было показано, что высокие показатели наклона спектра типичны для высокоскоростных потоков солнечного ветра.

Для исследования изменения угла наклона спектра мощности на интервале записи сейсмического события каждый спектр мощности вычислялся на интервале длиной 1024 точки.

Рис. 5. Спектр мощности сигнала и его линейные аппроксимации на трех участках.

Каждый последующий спектр вычислялся на интервале той же длины, но сдвинутом на одну точку относительно предыдущего. На каждом интервале проводилось быстрое Фурье преобразование с оконной фильтрацией Хэмминга. Результат такого вычисления с фрагментом записи самого события представлены на рис. 6.

Рис. 6. Фрагмент записи сейсмического сигнала от землетрясения на рис. 3 и график значений тангенса угла наклона его спектра мощности.

Как видно из рис. 6, колебания наклона спектра мощности до и после сейсмического события имеют около нулевые значения, которые соответствуют энергии сейсмического шума. Резкое укрупнение спектра мощности совпадает с приходом *P*-волны и зависит от ее энергии. Подобное падение связано с резкой концентрацией энергии в среде, а последующие за этим процессы диссипации обуславливают более плавный выход значения спектра мощности на около нулевой уровень. Несовпадение конца коды волны и выхода значения спектра мощности на прежний уровень говорит

о том, что в среде продолжают происходить колебания, амплитуда которых сравнима с амплитудой колебаний сейсмического шума.

Результаты расчетов значений тангенса угла наклона спектра мощности, полученных по фрагментам записей 18 землетрясений, также представлены в таблице. Результаты оценки линейной связи тангенса угла наклона спектра мощности сейсмического сигнала с энергетическим классом землетрясения представлены на рис. 7. Коэффициент линейной корреляции r составил -0.37 .

Рис. 7. Результаты оценки линейной связи тангенса угла наклона спектра мощности сейсмического сигнала с энергетическим классом землетрясения.

Заключение

Рассмотрены записи землетрясений, зарегистрированных на Камчатке в пункте наблюдений “Карымшина” при помощи измерительной системы на основе пьезокерамического сейсмоприемника. Построены спектры мощности сейсмических сигналов. Рассчитан тангенс угла наклона спектра мощности сейсмического сигнала в динамике в скользящем окне на интервале всей записи. Показано резкое укрупнение спектра мощности, совпадающее с приходом P -волны.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литература/References

- [1] Мищенко М. А. и др., “Мониторинг геоакустической эмиссии осадочных пород при помощи лазерного деформографа-интерферометра и трехкомпонентного пьезоэлектрического сейсмоприемника”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.*, **20**:4 (2017), 83–90. [Mishchenko M. A. et al., “Monitoring geoakusticheskoy emissii osadochnykh porod pri pomoshchi lazernogo deformografa-interferometra i trekhkomponentnogo p'ezoelektricheskogo seysmopriemnika”, *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, **20**:4 (2017), 83-90 (in Russian)].

- [2] Mishchenko M. et. al., "Joint analysis of low-frequency geoacoustic and deformation signals.", *E3S Web of Conferences*, **62** (2018), 02009.
- [3] Сычев В. Н. и др., "Оценка масштабов дальних корреляций по сигналам сейсмоакустической эмиссии приповерхностных осадочных пород на Камчатке", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **29:4** (2019), 190–200. [Sychev V.N. et. al., "Otsenka masshtabov dal'nikh korrelyatsiy po signalam seysmoakusticheskoy emissii pripoverkhnostnykh osadochnykh porod na Kamchatke", *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, **29:4** (2019), 190–200 (in Russian)].
- [4] Купцов А. В., Ларионов И. А., Шевцов Б. М., "Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений", *Вулканология и сейсмология*, **5** (2005), 45–58. [Kupcov A. V., Larionov I. A., Shevcov B. M., "Osobennosti geoakusticheskoy ehmissii pri podgotovke kamchatskih zemletryaseniy", *Vulkanologiya i sejsmologiya*, 2005, № 5, 45–58].
- [5] Муратов П. В. и др., "Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **25:5** (2018), 62–73. [Muratov P. V. et. al., "Elektricheskiy i akusticheskiy otklik pripoverkhnostnykh osadochnykh porod na prokhozhdenie seysmicheskikh voln ot zemletryaseniy", *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, **25:5** (2018), 62–73 (in Russian)].
- [6] Закупин А. С. и др., "Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне", *Физика Земли*, **5** (2014), 105–120. [Zakupin A. S. et. al., "Seismoacoustic responses to high-power electric pulses from well logging data at the Bishkek geodynamical test area", *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, **50:5** (2014), 692–706].
- [7] *Сейсмоприёмники пьезоэлектрические А16*, Руководство по эксплуатации, № 402152.004 РЭ, ЗАО Геоакустика, Москва, 2006, 40 с. [*Seismoprijomniki p'ezoelektricheskie A16*, Rukovodstvo po jekspluatácii, No 402152.004РЭ, 2006 (in Russian), 40 pp.].
- [8] Колмогоров А. Н., "Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса", *ДАН СССР*, **30:4** (1941), 476–481. [Kolmogorov A. N., "Lokal'naya struktura turbulentnosti v neshzhimaemoy вязкой zhidkosti pri ochen' bol'shikh chislakh Reynol'dsa", *DAN SSSR*, **30:4** (1941), 476–481 (in Russian)].
- [9] Фрик П. Г., *Турбулентность: модели и подходы*, Институт компьютерных исследований, Москва-Ижевск, 2003, 292 с. [Frik P. G., *Turbulentnost': modeli i podkhody*, Institut komp'yuternykh issledovaniy, Moskva-Izhevsk, 2003 (in Russian), 292 pp.].
- [10] Рязанцева М. О. и др., "Переменяемость плотности солнечного ветра вблизи межпланетной ударной волны", *Геомагнетизм и аэрономия*, **57:6** (2017), 696–705. [Ryazantseva M. O. et. al., "Peremezhaemost' plotnosti solnechnogo vetra vblizi mezhplanetnoy udarnoy volny", *Geomagnetizm i aeronomiya*, **57:6** (2017), 696–705 (in Russian)].
- [11] Рязанцева М. О. и др., "Особенности спектральных характеристик плазменных флуктуаций в различных крупномасштабных потоках солнечного ветра", *Геомагнетизм и аэрономия*, **59:2** (2019), 139–147. [Ryazantseva M. O. et. al., "Osobennosti spektral'nykh kharakteristik plazmennyykh fluktuatsiy v razlichnykh krupnomasshtabnykh potokakh solnechnogo vetra", *Geomagnetizm i aeronomiya*, **59:2** (2019), 139–147 (in Russian)].
- [12] Bruno R., Trenchi L., Telloni D., "Spectral Slope Variation at Proton Scales from Fast to Slow Solar Wind", *Astrophys. J. Lett.*, **793:1** (2014), L15.

On analysis of signals of seismic acoustic emission of surface sedimentary rocks in Kamchatka

V. N. Sychev¹, M. E. Cheshev¹, M. A. Mishchenko²

¹ Scientific Station RAS, 720049, Kyrgyzstan, Bishkek-49

² Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, 684034, Russia, Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya str., 7

E-mail: micle@ikir.ru

In Kamchatka, at the observation point “Karymshina”, using a measuring system based on a three-component piezoceramic seismic receiver, the signals of seismoacoustic emission of near-surface sedimentary rocks are monitored. At the output of the measuring system, an oscillatory acceleration is recorded in the frequency range of 0.5-400 Hz. The analysis is based on records of seismoacoustic signals from several regional earthquakes in 2019 with an energy class of $K_s > 10.0$. The probability density distribution function of such a signal is not always described by the normal distribution law; therefore, statistical physics methods are suitable for studying such stochastic time series, within which the properties of self-similarity of these signals are considered.

Key words: seismoacoustic emission, signal power spectrum, spectrum slope

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-150-158

Original article submitted: 22.10.2020

Revision submitted: 05.02.2021

For citation. Sychev V. N., Cheshev M. E., Mishchenko M. A. On analysis of signals of seismic acoustic emission of surface sedimentary rocks in Kamchatka. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **34**: 1, 150-158. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-150-158

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Lukovenkova O. O. et al., 2021

Funding. The research was partially carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Scientific Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek (topic No AAAA-A19-119020190064-9).

Monitoring of seismoacoustic emission signals was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS on the topic "Dynamics of physical processes in active zones of near space and geospheres" (2018-2020) state registration (topic No AAAA-A17 -117080110043-4).