

УДК 550.34

## ОТВЕТ НА ЗАМЕЧАНИЯ В.А. САЛТЫКОВА К СТАТЬЕ А.А. ЛЮБУШИНА, Г.Н. КОПЫЛОВОЙ, Ю.К. СЕРАФИМОВОЙ “СВЯЗЬ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ И ЭНТРОПИЙНЫХ СВОЙСТВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА НА КАМЧАТКЕ С НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ”

© 2021 г. А. А. Любушин<sup>1, \*</sup>, Г. Н. Копылова<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

\*E-mail: lyubushin@yandex.ru

\*\*E-mail: gala@emsd.ru

Поступила в редакцию 17.09.2020 г.

После доработки 22.09.2020 г.

Принята к публикации 12.10.2020 г.

DOI: 10.31857/S0002333721020058

Замечания В.А. Салтыкова сводятся к двум пунктам:

1. Можно ли использовать записи на широкополосных станциях для анализа свойств сейсмического шума в диапазоне периодов, выходящем формально за те пределы, которые указаны в технических паспортах к этим приборам?

2. Можно ли использовать классический коэффициент корреляции Пирсона для оценки сдвига сигналов друг относительно друга в случае, когда один или даже оба сигнала распределены не по нормальному закону.

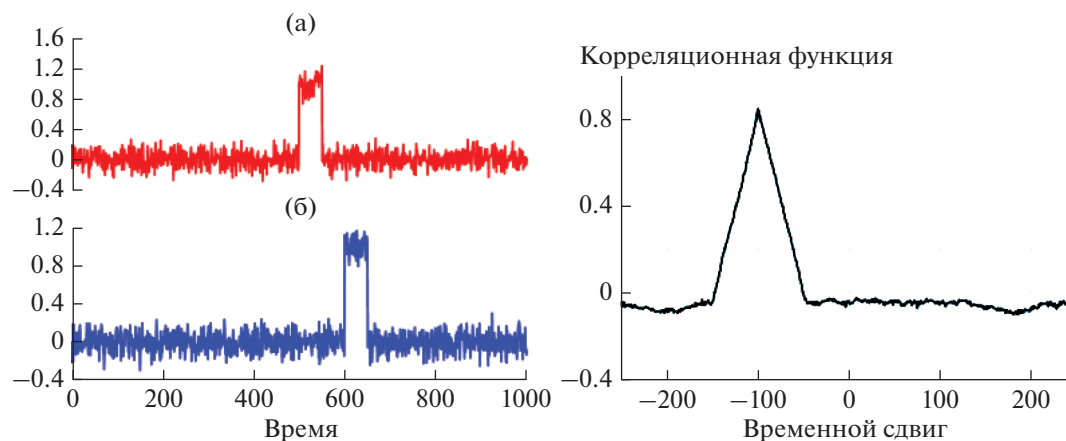
Ответим по каждому пункту:

1. Переход в низкочастотную часть спектра резко повышает долю прогностической информации в записях. Первоначально это было обнаружено в работах [Соболев и др., 2005; 2008; Любушин, Соболев, 2006; Соболев, Любушин, 2006; 2007; Любушин, 2008; Sobolev, Lyubushin, 2007; Sobolev et al., 2010]. Именно анализ мультифрактальных свойств низкочастотного сейсмического шума позволил дать заблаговременный прогноз мегаземлетрясения в Японии 11.03.2011 г. [Любушин, 2009; 2010; 2011; Lyubushin, 2010]. Обобщение этого опыта привело к созданию целого инструментария анализа сейсмического фона Земли, который детально изложен в работах [Любушин, 2014; 2016; Lyubushin, 2011; 2013; 2014; 2015; 2017; 2018a; 2018b; 2020c], посвященных анализу свойств синхронизации низкочастотных сейсмических пульсаций планеты в связи с глобальным сейсмическим процессом и подготовкой сильных землетрясений в различных регио-

нах Земли. В работах [Касимова и др., 2018; Любушин и др., 2015] разработанный программный аппарат был применен к анализу сейсмического фона Камчатки, что является предметом данной статьи. В работах [Lyubushin, 2020a; 2020b] с использованием мультифрактальных и энтропийных статистик низкочастотного сейсмического шума (глобального и на региональном уровне, в Японии и Калифорнии) была показана связь их трендов и свойств их синхронизации с неравномерностью вращения Земли, что также связано с тематикой рассматриваемой статьи.

В своих замечаниях В.А. Салтыков пишет: “Статья продолжает многолетнюю серию работ А.А. Любушина (с соавторами или единолично) по исследованию вариаций низкочастотного сейсмического шума”. Это справедливо, но лишь отчасти, поскольку независимо от А.А. Любушина (но часто с использованием программного аппарата, предоставленного им для свободного использования) исследования низкочастотного сейсмического фона в минутном диапазоне периодов были проведены в работах [Соболев, 2011; 2013; 2015a; 2015b; Соболев и др., 2014; 2017; 2020; Соболев, Закржевская, 2019].

Стоит также отметить исследования, в которых сейсмический фон анализировался не в минутном, а в часовом диапазоне периодов [Молоденский, 2015; Молоденский, Молоденский, Бегитова, 2016; Молоденский и др., 2017; Соболев и др., 2018], что является, с точки зрения “строго метрологического подхода”, еще более проблематичным.



**Рис. 1.** Пример двух негауссовских сигналов и оценка временного сдвига между ними с использованием корреляционной функции Пирсона.

Следует ли из комментариев В.А. Салтыкова, что результаты, изложенные в этих публикациях, являются некорректными? Поскольку работы, которые представлены в нашем кратком обзоре, содержат много нетривиальных результатов, раскрывающих детали связей процессов в различных оболочках Земли, в том числе подготавливающих сильные сейсмические события, то мы полагаем, что нет.

Важно отметить, что в работе [Касимова и др., 2018] показано, что характерные изменения статистических параметров низкочастотного сейсмического шума перед наиболее сильными Камчатскими землетрясениями (землетрясения 2013 г. Охотоморское,  $M = 8.3$  и 2016 г. Жупановское,  $M = 7.2$ ) соответствуют изменениям аналогичных параметров шума перед сильнейшими землетрясениями Японии. Такая согласованность показывает, что данные по сравнительно редкой сети камчатских станций вполне пригодны для изучения региональных вариаций сейсмического шума и использования в задачах геофизического мониторинга и прогнозирования землетрясений. Это дает возможность дальнейшего развития подхода, основанного на оценке мультифрактальных и энтропийных характеристик низкочастотного сейсмического шума, к изучению временных вариаций сейсмического шума на основе отечественных данных Геофизической службы РАН, получаемых с сетей широкополосных сейсмических станций в сейсмоактивных районах России.

2. Нормальное распределение выборок, для которых вычисляется коэффициент корреляции Пирсона, полезно лишь для оценки значимости корреляций. В нашей статье речь идет не об оценке статистической значимости линейной связи между логарифмом выделившейся сейсмической

энергии и всплесками меры когерентности между свойствами сейсмического шума и длиной суток, а об оценке временного сдвига между этими двумя процессами. Для получения оценки сдвига нормальность не имеет значения.

Приведем пример, который иллюстрируется на рис. 1. Возьмем две независимые реализации гауссового белого шума со стандартным отклонением 0.1 длиной 1000 отсчетов и внесем в них 2 ступенеобразные аномалии: добавим 1 к отсчетам 500–550 для одного сигнала и к отсчетам 600–650 для второго. Внесение этих аномалий делает сигналы негауссовыми и, кроме того, эти аномалии рассматриваются как сдвинутые друг относительно друга всплески на временной сдвиг в 100 отсчетов. Вычислим для них корреляционную функцию Пирсона, график которой также представлен на рис. 1. Как мы видим, несмотря на негауссовость коррелируемых сигналов, максимум корреляционной функции четко указывает на временной сдвиг  $-100$  отсчетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин А.А. Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // *Физика Земли*. 2018. № 2. С. 269–283.
- Любушин А.А., Соболев Г.А. Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 18–28.
- Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // *Физика Земли*. 2008. № 4. С. 17–34.

- Любушин А.А. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // *Физика Земли*. 2009. № 5. С. 15–28.
- Любушин А.А. Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // *Физика Земли*. 2010. № 6. С. 86–96.
- Любушин А.А. Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // *Физика Земли*. 2011. № 6. С. 26–34.
- Любушин А.А. Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997–2012 // *Физика Земли*. 2014. № 3. С. 18–27.
- Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н. О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // *Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле*. 2015. № 2. Вып. 26. С. 20–36. [http://www.kscnet.ru/kraesc/2015/2015\\_26/art3.pdf](http://www.kscnet.ru/kraesc/2015/2015_26/art3.pdf)
- Любушин А.А. Связь полей низкочастотных сейсмических шумов Японии и Калифорнии // *Физика Земли*. 2016. № 6. С. 28–38.
- Молоденский М.С. Временные изменения приливного отклика среды перед Великим Японским землетрясением по данным ближайших к очагу сейсмических станций // *Физика Земли*. 2015. № 3. С. 1–4.
- Молоденский М.С., Молоденский Д.С., Бегитова Т.А. Временные изменения в очаговой зоне Японского землетрясения 11.03.2011 (M = 9) по данным о приливном отклике // *Физика Земли*. 2016. № 2. С. 1–9.
- Молоденский М.С., Молоденский С.М., Молоденский Д.С., Бегитова Т.А. Об устойчивости решения задачи определения временных изменений приливного отклика среды в окрестностях очагов сильнейших землетрясений // *Физика Земли*. 2017. № 3. С. 132–135.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2005. № 8. С. 3–27.
- Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // *Физика Земли*. 2006. № 9. С. 5–17.
- Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 года на Суматре // *Физика Земли*. 2007. № 5. С. 3–16.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Асимметричные импульсы, периодичности и синхронизация низкочастотных микросейсм // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 2. С. 135–152.
- Соболев Г.А. Низкочастотный сейсмический шум перед землетрясением Тохоку 11 марта 2011 года с магнитудой 9 // *Физика Земли*. 2011. № 12. С. 11–22.
- Соболев Г.А. О некоторых свойствах возникновения и эволюции колебаний Земли после землетрясений // *Физика Земли*. 2013. № 5. С. 12–27.
- Соболев Г.А., Соболев Д.Г., Мигунов И.Н., Закржевская Н.А. Некоторые свойства низкочастотного сейсмического шума // *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 15–24.
- Соболев Г.А. Вызванные землетрясениями когерентные колебания Земли // *Физика Земли*. 2015а. № 1. С. 18–27.
- Соболев Г.А. Пульсации собственных колебаний Земли // *Физика Земли*. 2015б. № 3. С. 3–12.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н., Соболев Д.Г. Миграция пульсаций после землетрясений // *Физика Земли*. 2017. № 4. С. 3–27.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А. Пространственная и временная структура глобального низкочастотного сейсмического шума // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 3–14.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н. Пульсации собственных колебаний Земли после землетрясений в часовом диапазоне периодов // *Физика Земли*. 2018. № 3. С. 3–17.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н., Соболев Д.Г., Бойков А.Н. Влияние магнитных бурь на низкочастотный сейсмический шум // *Физика Земли*. 2020. № 3. С. 3–28.
- Lyubushin A. Multifractal Parameters of Low-Frequency Microseisms. In: *Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes*, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences 1 / V. de Rubeis et al. (Eds.). Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag. 2010. Ch. 15. P. 253–272. [http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-642-12300-9\\_15](http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-642-12300-9_15)
- Lyubushin A.A. Seismic Catastrophe in Japan on March 11, 2011: Long-Term Prediction on the Basis of Low-Frequency Microseisms // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2011. V. 46. № 8. P. 904–921. <https://doi.org/10.1134/S0001433811080056>
- Lyubushin A. Prognostic properties of low-frequency seismic noise // *Natural Science*. 2012. 4. 659–666. <https://doi.org/10.4236/ns.2012.428087>
- Lyubushin A. How soon would the next mega-earthquake occur in Japan? // *Natural Science*. 2013. V. 5. № 8A1. P. 1–7. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.58A1001>
- Lyubushin A.A. Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise // *Natural Hazards*. 2014. V. 70. Iss. 1. P. 471–483. <http://dx.doi.org/10.1007%2F978-0-13-0823-7>
- Lyubushin A.A. Wavelet-based coherence measures of global seismic noise properties // *J. Seismology*. 2015. V. 19. № 2. P. 329–340. <https://doi.org/10.1007/s10950-014-9468-6>
- Lyubushin A.A. Long-range coherence between seismic noise properties in Japan and California before and after Tohoku mega-earthquake // *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2017. № 52. P. 467–478. <https://doi.org/10.1007/s40328-016-0181-5>
- Lyubushin A. Synchronization of Geophysical Fields Fluctuations. In: *Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications* / T. Chelidze, L. Telesca, F. Vallianatos (Eds.). Oxford, Cambridge, Amsterdam: Elsevier. 2018a. Ch. 6. P. 161–197. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7>
- Lyubushin A.A. Cyclic Properties of Seismic Noise and the Problem of Predictability of the Strongest Earthquakes in Japanese Islands // *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2018b.

V. 54. № 10. P. 1460–1469.

<https://doi.org/10.1134/S0001433818100067>

*Lyubushin A.* Trends of Global Seismic Noise Properties in Connection to Irregularity of Earth's Rotation // *Pure Appl. Geophys.* 2020a. № 177. P. 621–636.

<https://doi.org/10.1007/s00024-019-02331-z>

*Lyubushin A.* Connection of Seismic Noise Properties in Japan and California with Irregularity of Earth's Rotation // *Pure Appl. Geophys.* 2020b.

<https://doi.org/10.1007/s00024-020-02526-9>

*Lyubushin A.A.* Seismic Noise Wavelet-Based Entropy in Southern California // *J. Seismology*, 2020c.

<https://doi.org/10.1007/s10950-020-09950-3>

*Sobolev G.A., Lyubushin A.A.* Using modern seismological data to reveal earthquake precursors // *Russ. J. Earth Sci.* 2007. V. 9.

<https://doi.org/10.2205/2007ES000220>

*Sobolev G.A., Lyubushin A.A., Zakrzhevskaya N.A.* Synchronizations of Microseismic Oscillations as the Indicators of the Instability of a Seismically Active Region. Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes, *Geoplanet: Earth and Planetary Sciences 1* / V. de Rubeis et al. (Eds.). Heidelberg, Berlin: Springer Verlag. 2010. Ch. 14. P. 243–252.

[http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-642-12300-9\\_14](http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-642-12300-9_14)