

ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНОСТИ СВОЙСТВ ПОЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ НА КАМЧАТКЕ

Любушин А.А.¹, Копылова Г.Н.², Касимова В.А.², Таранова Л.Н.²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, e-mail: lyubushin@yandex.ru

²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, e-mail: gala@emsd.ru

Введение

В работе исследуются эффекты когерентного поведения параметров низкочастотного сейсмического шума на Камчатке. Используется методика анализа данных, изложенная в работах [6, 12], где с ее помощью было рассмотрено когерентное поведение характеристик глобального сейсмического шума, зарегистрированного на сети из 229 широкополосных сейсмических станций, расположенных по всему миру за промежуток времени с начала 1997 года по конец 2013 года. Методика включает в себя разбиение сети станций на заданное число групп и вычисления ежесуточных временных рядов медианных значений параметров шума от каждой группы станций. Далее исследуется когерентное поведение полученных синхронных многомерных временных рядов с помощью множественной спектральной меры когерентности в скользящем временном окне длиной 1 год. Если для глобальной сейсмической сети использовалось разбиение на 8 групп станций, то для Камчатки брались 3 группы станций и анализировались наблюдения с начала 2011 года.

Исходные данные

В качестве источников сейсмических данных в работе использовались записи вертикальных компонент движений грунта на канале ВНЗ с частотой оцифровки 100 Гц (за исключением станции РЕТ, для которой частота оцифровки равна 20 Гц) с 01 января 2011 по 31 марта 2015 гг., полученные на 21 широкополосной сейсмической станции Геофизической службы РАН, расположенных на территории Камчатского края и о-ва Парамушир, Курильские о-ва (рис. 1). В таблице 1 приводятся данные о сейсмических станциях. Для создания 1-минутных временных рядов сейсмического шума, зарегистрированного на каждой станции, вычислялись средние значения исходных записей в последовательных интервалах времени длиной 6000 отсчетов. В работе [1] произведен анализ спектров полученных 1-минутных временных рядов низкочастотного сейсмического шума.

На рис.1 представлены положения 21 широкополосной сейсмической станции и их разбиение на 3 группы станций. Первая группа, которую можно назвать Северной, состоит из 5 станций, для которых широта их положения превышает 57°СШ. Вторая группа станций, Центральная, имеет широты от 54°СШ до 57°СШ и состоит из 7 станций. Наконец, 3-я группа станций, Южная, состоит из 9 станций и имеет широты менее 54°СШ.

Мульти-фрактальные свойства сейсмического шума

Для каждой станции ежесуточно вычислялись параметры мульти-фрактальных спектров сингулярности в последовательных временных окнах длиной 1 сутки.

Рассмотрим некоторое случайное колебание $x(t)$ на интервале времени $[t - \delta/2, t + \delta/2]$ длиной δ с центром во временной точке t . Рассмотрим размах $\mu(t, \delta)$ случайного колебания на этом интервале, то есть разницу между максимальным и минимальным значениям: $\mu(t, \delta) = \max_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} x(s) - \min_{t-\delta/2 \leq s \leq t+\delta/2} x(s)$. Если устремить $\delta \rightarrow 0$, то $\mu(t, \delta)$ будет также стремиться к нулю, но здесь важна скорость этого убывания. Если существует предел

$h(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log(\mu(t, \delta))}{\log(\delta)}$, то величина $h(t)$ называется экспонентой Гельдера-Липшица. Если величина

$h(t)$ не зависит от момента времени t : $h(t) = \text{const} = H$, то случайное колебание $x(t)$ называется моно-фрактальным, а величина H - экспонентой Херста. Если же экспоненты Гельдера-Липшица

$h(t)$ существенно различаются для разных моментов времени t , то случайное колебание называется мульти-фракталом и для него можно определить понятие спектра сингулярности $F(\alpha)$. Для этого мысленно выделим множество $C(\alpha)$ таких моментов времени t , которые имеют одно и то же значение α экспоненты Гельдера-Липшица: $h(t) = \alpha$.

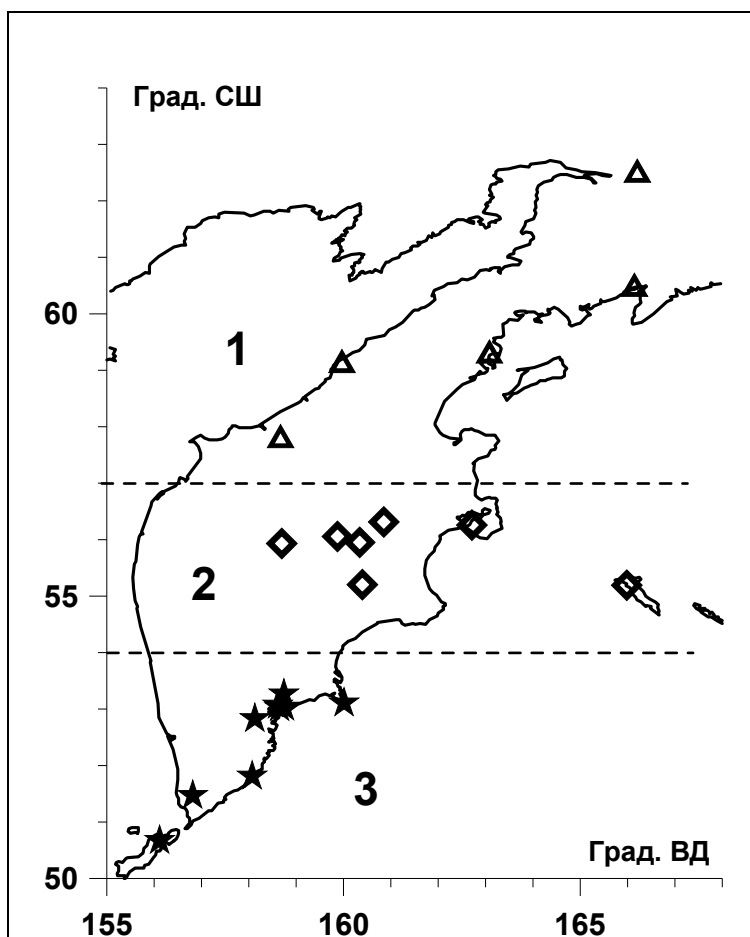


Рис.1. Положения 21 широкополосной сейсмической станции на Камчатке и их разбиение на 3 группы.

Таблица 1. Координаты положений сейсмических станций.

Код станции	Северная широта, град.	Восточная долгота, град.
AVH	53.264	158.740
BKI	55.194	165.984
DAL	53.031	158.754
IVS	53.066	158.608
KMSK	62.467	166.206
KRM	52.828	158.131
KIR	55.953	160.342
KLY	56.317	160.857
KOZ	56.058	159.872
KDT	51.81	158.07
KBG	56.258	162.713
OSS	59.262	163.072
PAL	59.094	159.968
PAU	51.468	156.815
PET	53.023	158.650
SKR	50.670	156.116
TIGL	57.765	158.671
TL1	60.446	166.145
TUMD	55.203	160.399
SPN	55.106	160.011
ESO	55.932	158.695

Множества $C(\alpha)$ существуют, т. е. содержат какие-то элементы и не являются пустыми множествами, не для всех значений α . То есть существуют некоторые минимальное α_{\min} и максимальное α_{\max} такие, что лишь для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ множества $C(\alpha)$ непустые. Мульти-фрактальный спектр сингулярности $F(\alpha)$ - это фрактальная размерность множества точек $C(\alpha)$. Параметр $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, называемый шириной носителя спектра сингулярности, представляется наиболее важной мульти-фрактальной характеристикой. Кроме того, значительный интерес представляет аргумент α^* , доставляющий максимум спектру сингулярности: $F(\alpha^*) = \max_{\alpha_{\max} \leq \alpha \leq \alpha_{\min}} F(\alpha)$, называемый обобщенным показателем Херста.

Детали вычисления мульти-фрактальных статистик шума подробно изложены в работах [3, 4]. В работах [4, 5, 9, 10, 11] мульти-фрактальные характеристики сейсмического шума использовались для оценки сейсмической опасности на Японских островах и, в частности, позволили дать заблаговременный прогноз мегаземлетрясения Тохоку 11 марта 2011 года. В работе [7] были построены карты распределения мульти-фрактальных параметров сейсмического шума на Камчатке.

В соответствии с используемой методикой производились оценки мульти-фрактальных статистик $\Delta\alpha$ и α^* в последовательных интервалах времени длиной 1440 отсчетов или 1 сутки для 1-минутных временных рядов по каждой станции. Для каждой группы станций ежедневно от всех станций вычислялись медианные значения параметров $\Delta\alpha$ и α^* , в результате чего получались 3-мерные временные ряды, графики компонент которых изображены на рис.2.

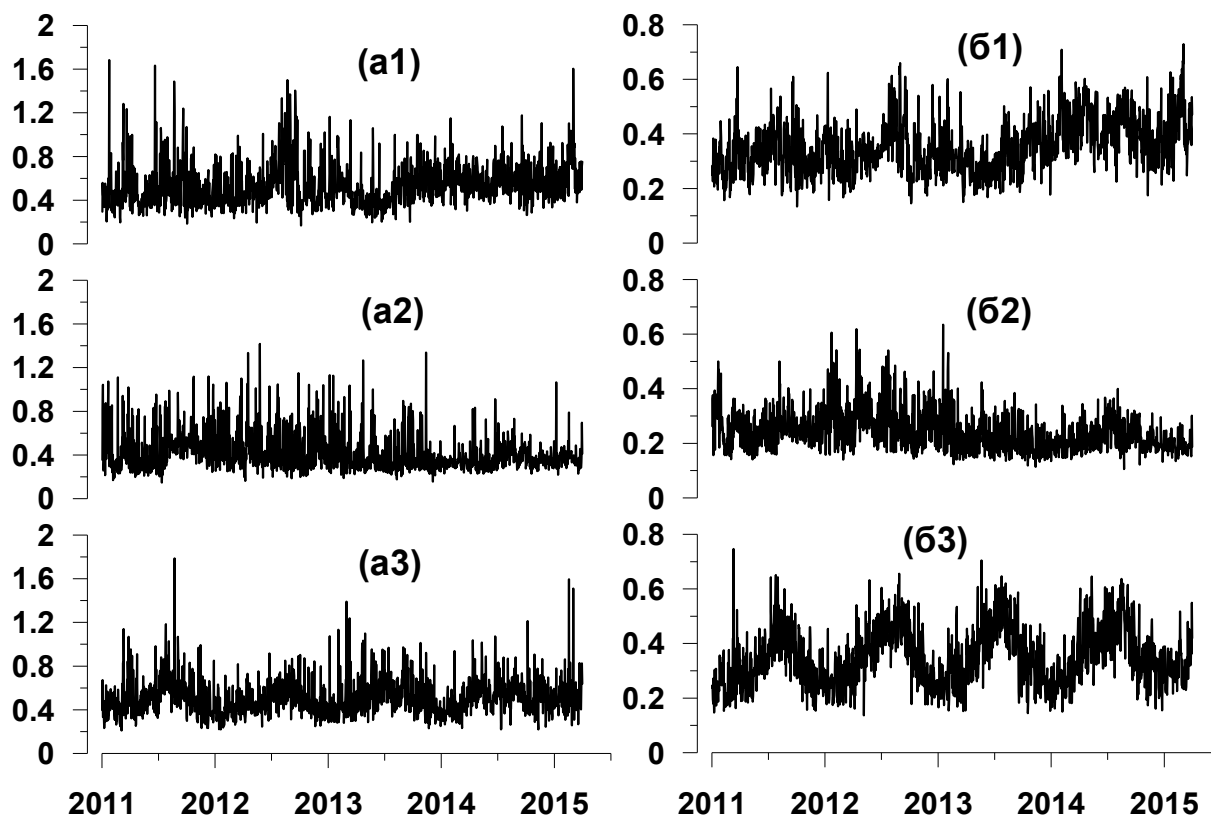


Рис. 2. (a1)-(a3) – графики медиан ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ для групп станций 1-3 на рис. 1; (б1)-(б3) – графики медиан обобщенного показателя Херста α^* для групп станций 1-3 на рис.1.

Следует отметить наличие сильной сезонной компоненты для временных рядов параметров шума от Южной группы станций (рис.2(a3) и 2(б3)).

Спектральная мера когерентности

Для выделения эффектов синхронного поведения средних значений параметров сейсмического фона от различных групп станций (рис. 2) сейсмической сети, используется спектральная мера когерентности, предложенная в [2]. В работах [2, 3] изложены все технические детали вычислений, которые здесь опущены. Спектральная мера когерентности $\nu(\tau, \omega)$ строится как

модуль произведения покомпонентных канонических когерентностей $\nu(\tau, \omega) = \prod_{j=1}^m |\mu_j(\tau, \omega)|$. Здесь

$m \geq 2$ - общее число совместно анализируемых временных рядов (размерность многомерного временного ряда), ω - частота, τ - временная координата правого конца скользящего временного окна, состоящего из определенного числа смежных отсчетов, $\mu_j(\tau, \omega)$ - каноническая когерентность j -го скалярного временного ряда, которая описывает силу связанности этого ряда со всеми прочими рядами. Величина $|\mu_j(\tau, \omega)|^2$ является обобщением обычного квадратичного спектра когерентности между двумя сигналами на случай, когда второй сигнал является не скалярным, а векторным. Выполняется неравенство $0 \leq |\mu_j(\tau, \omega)| \leq 1$ и чем ближе значение $|\mu_j(\tau, \omega)|$ к единице, тем сильнее

линейно связаны вариации на частоте ω во временном окне с координатой τ j -ого ряда с аналогичными вариациями во всех прочих рядах. Соответственно величина $0 \leq \nu(\tau, \omega) \leq 1$ в силу своего построения описывает эффект совокупного когерентного (синхронного, коллективного) поведения всех сигналов.

Заметим, что, в силу построения, значения величины $\nu(\tau, \omega)$ принадлежат интервалу $[0,1]$ и чем ближе соответствующее значение к единице, тем сильнее связь между вариациями компонент многомерного временного ряда на частоте ω для временного окна с координатой τ . Следует подчеркнуть, что сравнение абсолютных значений статистики $\nu(\tau, \omega)$ возможно лишь для одного и того же числа m одновременно обрабатываемых временных рядов – поскольку, в силу формулы для $\nu(\tau, \omega)$, при росте m величина ν убывает, как произведение m величин, меньших единицы. Если рассматриваются лишь 2 временных ряда, $m=2$, то функция $\nu(\tau, \omega)$ становится обычным квадратичным спектром когерентности (частотно зависимым квадратом коэффициента корреляции). В нашем случае число одновременно анализируемых временных рядов $m=3$. Для оценки спектральной матрицы многомерных временных рядов использовалась векторная авторегрессионная модель 5-го порядка [8]. Оценки производились в скользящем временном окне длиной 365 суток.

Помимо частотно-временной зависимости $\nu(\tau, \omega)$ ниже используется чисто временная мера максимальной по всем частотам меры когерентности в текущем временном окне с координатой τ : $\nu_{\max}(\tau) = \max_{\omega} \nu(\tau, \omega)$. Заметим, что величина $\nu_{\max}(\tau)$ является аналогом множественного коэффициента корреляции, вычисляемого в скользящем временном окне. Однако, в силу того, что максимум берется по частотам, этот коэффициент учитывает временные сдвиги между скалярными компонентами многомерного временного ряда внутри текущего временного окна.

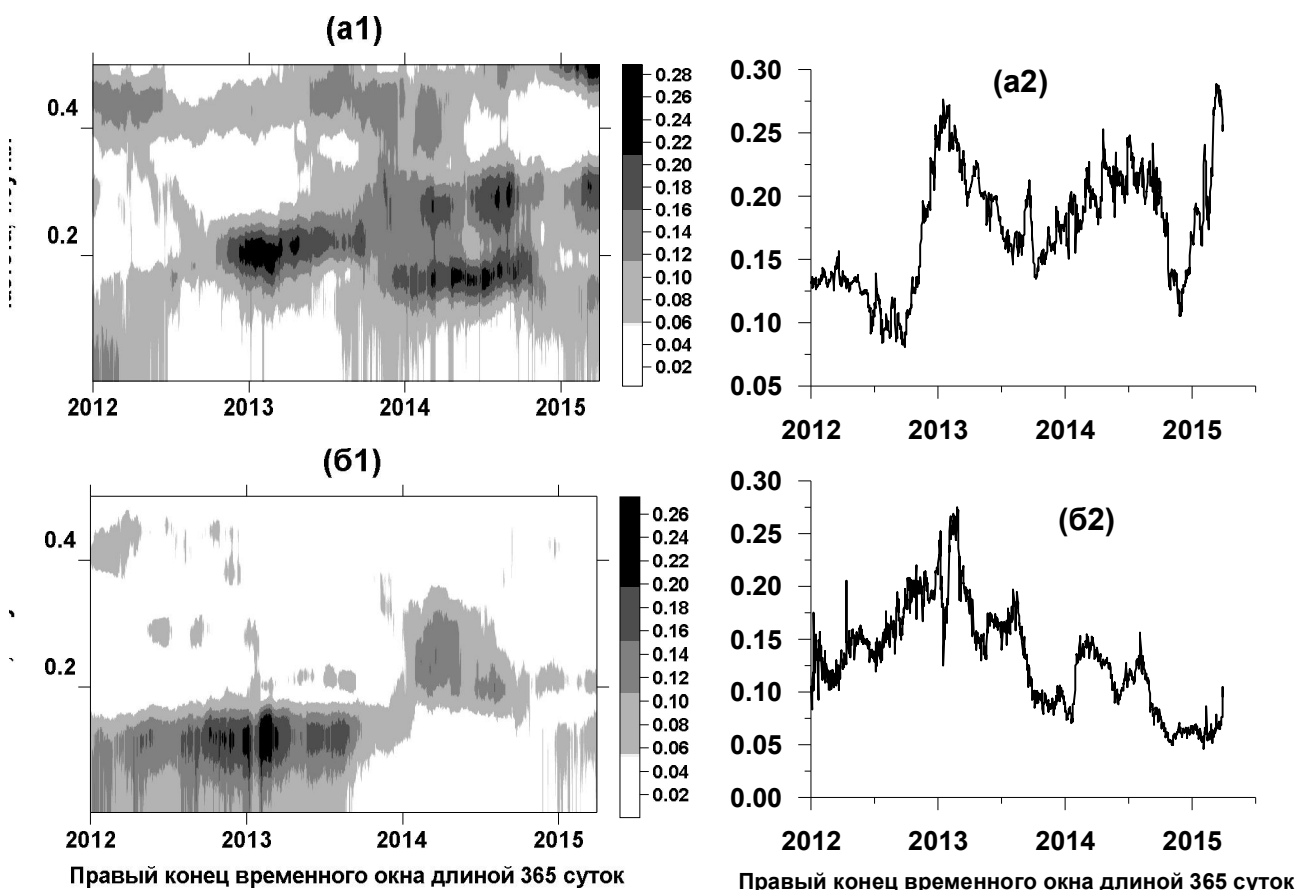


Рис.3. (a1)-(a2) – частотно-временная диаграмма спектральной меры когерентности $\nu(\tau, \omega)$ и ее чисто временной меры $\nu_{\max}(\tau)$ для 3-мерного временного ряда медиан ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ на рис.2(a1), 2(a2) и 2(a3); (b1)-(b2) – то же самое, но для 3-мерного временного ряда обобщенного показателя Херста α^* на рис.2(b1), 2(b2) и 2(b3).

На рис.3 представлены частотно-временные диаграммы $v(\tau, \omega)$ и графики чисто временных мер $v_{\max}(\tau)$ для 3-мерных временных рядов медиан мульти-фрактальных параметров.

Выводы

Несмотря на короткий интервал проведения наблюдений за сейсмическим шумом (чуть больше 4-х лет), накопленный объем данных уже позволил выделить значимые эффекты его поведения. В частности, интересным представляется сильная сезонная компонента изменения медианных свойств шума для южной группы станций (рис.2(а3), 2(б3)). Что же касается эффектов когерентности характеристик шума, то из частотно-временных диаграмм на рис.3(а1) и 3(б1) видно, что всплески когерентности в основном приходятся на диапазон периодов от 5 до 10 суток, а их максимумы по частотам (рис.3(а2) и 3(б2)) имеют пиковые значения для годового интервала времени перед Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., $M_w = 8.3$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-05-00414 и Министерства образования и науки Российской Федерации (в соответствии с требованием государственного контракта №14.577.21.0109).

Список литературы

1. Касимова В.А., Копылова Г.Н. Спектральная структура низкочастотного сейсмического шума на широкополосных станциях Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 64-68.
2. Любушин А.А. Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга // Физика Земли. 1998. №1. С.59-66.
3. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
4. Любушин А.А. Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсам // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 9-35.
5. Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. № 8. С. 23-33.
6. Любушин А.А. Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997-2012 // Физика Земли. 2014. № 3. С. 18-27.
7. Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н. Мульти-фрактальные характеристики сейсмического шума на Камчатке, 2011-2013 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Четвертой научно-техн. конф. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 382-386.
8. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
9. Lyubushin A. Prognostic properties of low-frequency seismic noise // Natural Science. 2012. V. 4. № 8A. P. 659-666.
10. Lyubushin A. How soon would the next mega-earthquake occur in Japan // Natural Science. 2013. V. 5. № 8 A1. P. 1-7.
11. Lyubushin A.A. Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise // Natural Hazards. January 2014. V. 70. Iss. 1. P. 471-483.
12. Lyubushin A.A. Wavelet-based coherence measures of global seismic noise properties // Journal of Seismology, April 2015, Volume 19, Issue 2, pp 329-340.