

УДК 550.34

ЭФФЕКТЫ КОГЕРЕНТНОСТИ В ИЗМЕНЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ ФОНОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА, КАМЧАТКА, 2011–2017 гг.

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

¹Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru, vika@emsd.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН - ИФЗ РАН, г. Москва, lyubushin@yandex.ru

Введение

В работе представлены результаты исследований вариаций фонового сейсмического шума (ФСШ) на Камчатке с использованием данных от сети широкополосных сейсмических станций ГС РАН (рис. 1) и метода, предложенного А.А. Любушиным [7–10]. Основу исследования составляют пополняемая база данных непрерывных записей вертикальных компонент на 21 станции с дискретизацией 1 минута [3, 11], комплекс программ для расчета статистических параметров ФСШ и оценок их когерентного поведения; ГИС-проект [1], созданный для отображения результатов расчета параметров ФСШ в виде набора карт с дискретизацией по времени от суток до месяцев и лет, а также результаты анализа пространственно-временного распределения параметров ФСШ в сопоставлении с произошедшими сильными землетрясениями.

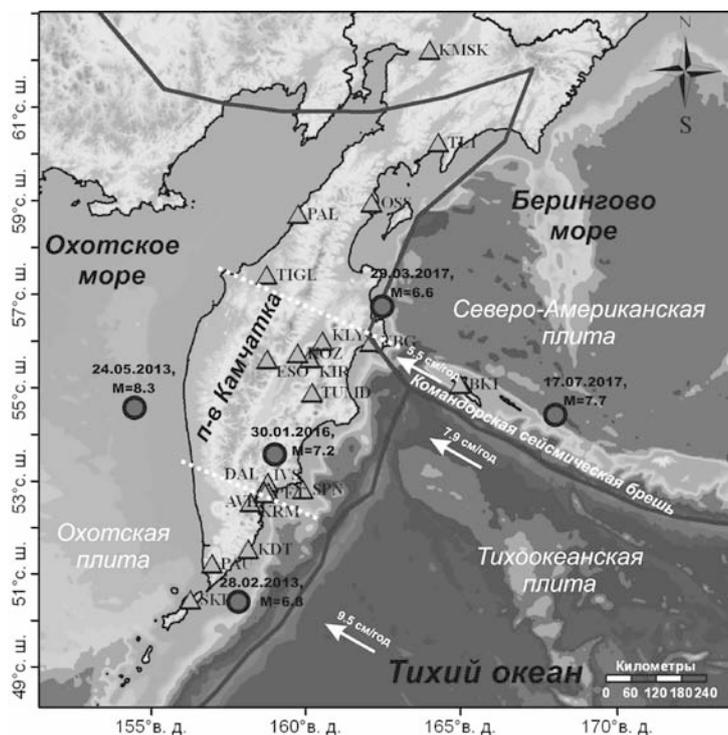


Рис. 1. Карта расположения сейсмостанций ФИЦ ЕГС РАН (треугольники), эпицентров землетрясений с $M_w \geq 6.6$ (кружки) (табл.) и границ тектонических плит [13]; выделение северной, центральной и южной групп станций (сверху вниз), границы соответствующих районов обозначены пунктирными линиями

В качестве показателей изменчивости ФСШ рассматриваются среднесуточные величины статистических параметров 1-минутных рядов шума, рассчитанные для каждой станции - обобщенный показатель Херста α^* , ширина носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, вейвлетная спектральная экспонента β , минимальная нормализованная энтропия вейвлет-коэффициентов шума E_n , а также величина спектральной меры когерентного поведения четырехмерного ряда указанных статистик ФСШ $\nu(\tau, \omega)$, где τ - временная координата правого конца скользящего временного окна, ω - частота.

Описание алгоритмов вычисления α^* , $\Delta\alpha$, β , E_n , $\nu(\tau, \omega)$, способов представления и анализа пространственно-временных распределений статистических параметров поля ФСШ даны в предшествующих работах [6–11].

В настоящей работе демонстрируются пространственно-временные распределения параметров поля ФСШ за период наблюдений 2011–2017 гг. в сопоставлении с сильными землетрясениями. Основное внимание уделяется эффектам увеличения когерентности в изменениях четырехмерного ряда статистик ФСШ, интерпретация которых проводится с учетом сильных землетрясений, тектонического строения района, конфигурации сети, сезонных вариаций шума, а также возможного влияния активного вулканизма, слабой локальной сейсмичности и берегового эффекта.

Наиболее сильными землетрясениями за рассматриваемый период были события 28.02.2013 г., $M = 6.8$; мантийное Охотоморское 24.05.2013 г., $M = 8.3$; Жупановское 30.01.2016 г., $M = 7.2$; Южно-Озерновское 29.03.2017 г., $M = 6.6$; Ближне-Алеутское 17.07.2017 г., $M = 7.7$ (таблица).

В случае последнего землетрясения, произошедшего в районе Командорской сейсмической брешы, активизировался фрагмент сейсмоактивной области размером 500–600 км, когда в течение месяца вдоль Алеутской дуги произошло более 400 афтершоков, из них десять событий с $M \geq 5.0$ [12].

Таблица. Характеристика сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений 2011–2017 гг., произошедших в районе Камчатки (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>)

№	Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Координаты		Глубина, км	Магнитуда, M_w
			град., с.ш.	град., в.д.		
1	28.02.2013	14:05:50	50.942	157.339	41	6.8
2	24.05.2013	05:44:49	54.874	153.281	609	8.3
3	30.01.2016	03:25:10	54.007	158.506	161	7.2
4	29.03.2017	04:09:24	56.940	162.786	17	6.6
5	17.07.2017	23:34:17	54.443	168.857	20	7.7

Методика исследований

Оценка изменчивости поля фонового сейсмического шума производилась с помощью набора карт, характеризующих пространственно-временное распределение статистик шума (рис. 2) и графиков изменения временных рядов медианных значений параметров ФСШ от всех станций сети и от выделенных групп станций (рис. 3а). Для оценки когерентного поведения параметров поля ФСШ производилось построение частотно-временных диаграмм спектральной меры когерентности четырехмерных временных рядов медианных значений α^* , $\Delta\alpha$, β и En (рис. 3, 4, 5 (б, в)).

Для анализа изменений параметров ФСШ перед землетрясениями (табл.) были построены усредненные карты их распределений за периоды времени 6 и 3 месяцев (рис. 2). Для построения карт анализируемая область в диапазоне 50 – 64° с. ш. и 155 – 168° в. д. покрывалась равномерной сеткой из 50×50 узлов. На картах отражается распределение статистик по площади, полученное методом интерполяции совокупности медиан параметров от трех ближайших к каждому узлу станций. При усреднении ежедневных карт по всем дням внутри заданного интервала времени, получаются усредненные карты, характеризующие особенности изменения отдельных параметров по пространству за соответствующий интервал времени. Анализ совокупности таких карт для одного и того же интервала времени и их изменчивости во времени позволяет проследить главные особенности поля ФСШ (рис. 2). При интерпретации карт не рассматривались области, где сейсмостанции отсутствовали, а также районы, удаленные от крайних станций на расстояние, превышающее среднее расстояние между станциями.

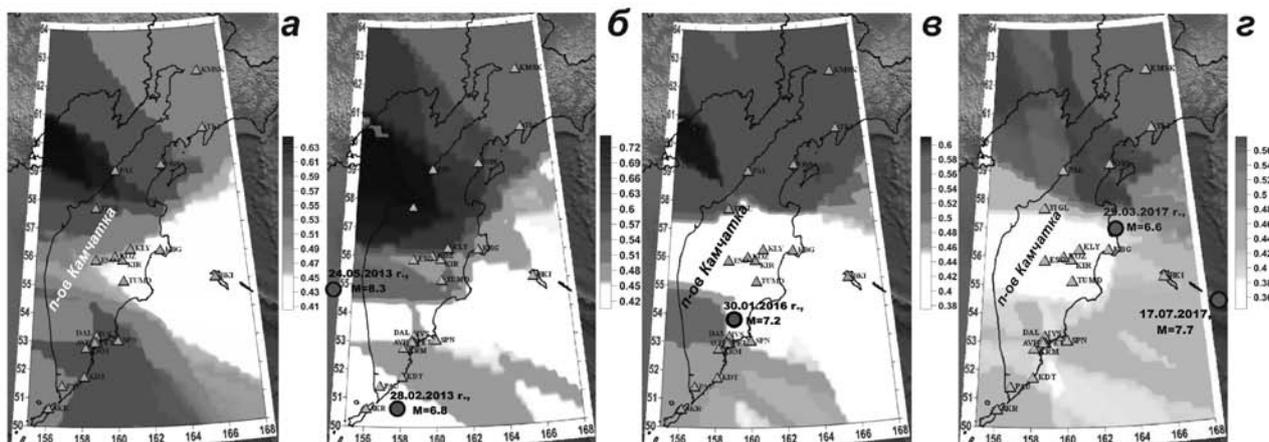


Рис. 2. Карты распределения мульти-фрактального параметра $\Delta\alpha$ поля ФСШ за периоды наблюдений (слева - направо): с 01.01.2011 по 31.12.2011 гг. (а), с 28.11.2012 по 28.02.2013 гг. (за 3 месяца до землетрясения № 1, и 6 месяцев до № 2, табл.) (б), с 01.09.2015 по 30.11.2015 гг. (за 5 месяцев перед событием № 3) (в), с 01.01.2017 по 30.03.2017 гг. (за 3 месяца перед землетрясением № 4, и за 6 месяцев перед землетрясением № 5) (г)

На рис. 3^а представлены временные ряды медианных значений четырех параметров ФСШ от всех станций сети в сопоставлении с произошедшими сейсмическими событиями (табл.). При их построении ряды параметров шума подвергались полосовой фильтрации с удалением полосы с периодами 120–400 сут для компенсации сезонной компоненты. По графикам (рис. 3^а) проводится оценка динамики изменчивости поля ФСШ во времени.

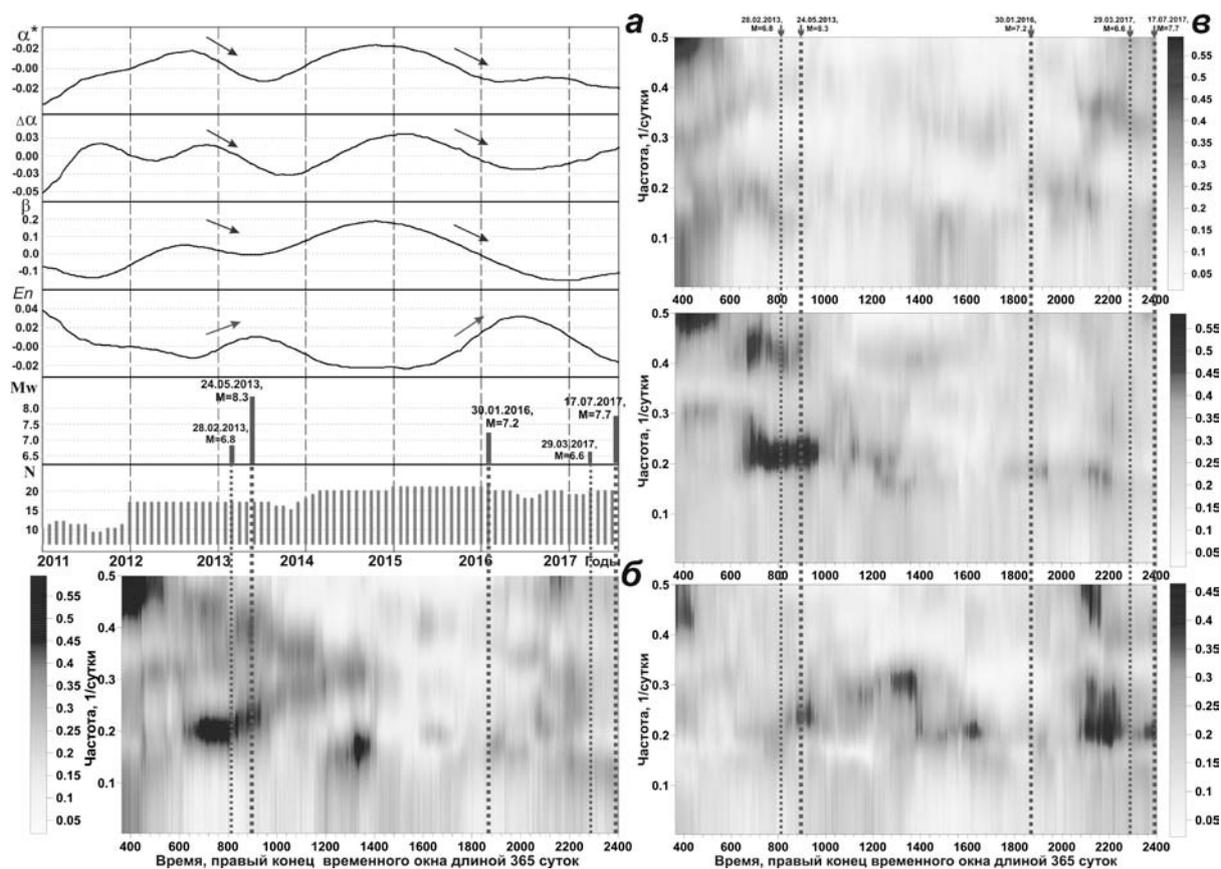


Рис. 3. Анализ когерентного поведения статистических параметров ФСШ в сопоставлении с произошедшими землетрясениями (вертикальные пунктирные линии) за период с 1 января 2011 по 31 июля 2017 гг.: а - изменение медианных значений α^* , $\Delta\alpha$, β и En в сопоставлении с частотно-временной диаграммой эволюции спектральной меры когерентности $v_{max}(\tau, \omega)$ 4-хмерного ряда медианных значений параметров ФСШ для всей сети станций (б); (в) – аналогичные диаграммы, построенные по данным от северной, центральной, и южной групп станций (сверху вниз)

При анализе карт и графиков предполагалось, что уменьшение величин α^* , $\Delta\alpha$, β и увеличение величины En указывает на повышение сейсмической опасности и на угрозу возникновения сильного землетрясения с M порядка 7 и более.

Использование критериев повышения величин нормализованной энтропии En и понижения ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ для выделения опасных районов основывается на предположении о консолидации малых блоков земной коры во временную структуру больших размеров, которая способна накопить энергию для крупного сейсмического события. При этом повышенные значения En могут быть обусловлены увеличением числа низкочастотных компонент в сейсмических записях при взаимных перемещениях неконсолидированных блоков земной коры. Кроме этого, формирование крупного консолидированного блока может сопровождаться уменьшением разнообразия передаточных и резонансных свойств среды, что сопровождается потерей мульти-фрактальности временных рядов ФСШ и уменьшением параметров α^* , $\Delta\alpha$ и β [6–10].

Для изучения особенностей когерентного поведения поля ФСШ производилось построение частотно-временных диаграмм эволюции спектральной меры когерентности $v(\tau, \omega)$ [6] 4-хмерных временных рядов медианных значений параметров α^* , $\Delta\alpha$, β и En по всей сети станций и по выделенным группам станций (рис. 3 б,в; 4 б,в; 4 б,в). По таким диаграммам определялись интервалы времени и частотные полосы проявления максимальных значений $v_{max}(\tau, \omega)$, показывающих увеличение когерентности в изменениях всех четырех статистик шума, как для всей сети станций, так и для выделенных групп станций (рис. 3 б,в; 4 б,в). Разбиение сети на группы станций (северная, центральная и южная группы станций, см. рис. 1) проводилось в соответствии с конфигурацией сети и основными тектоническими структурами Камчатки [5, 13], а также с учетом близости расположения станций к акваториям и особенностей спектрального состава параметров ФСШ [2, 3, 11] (континентальная и прибрежная группы станций).

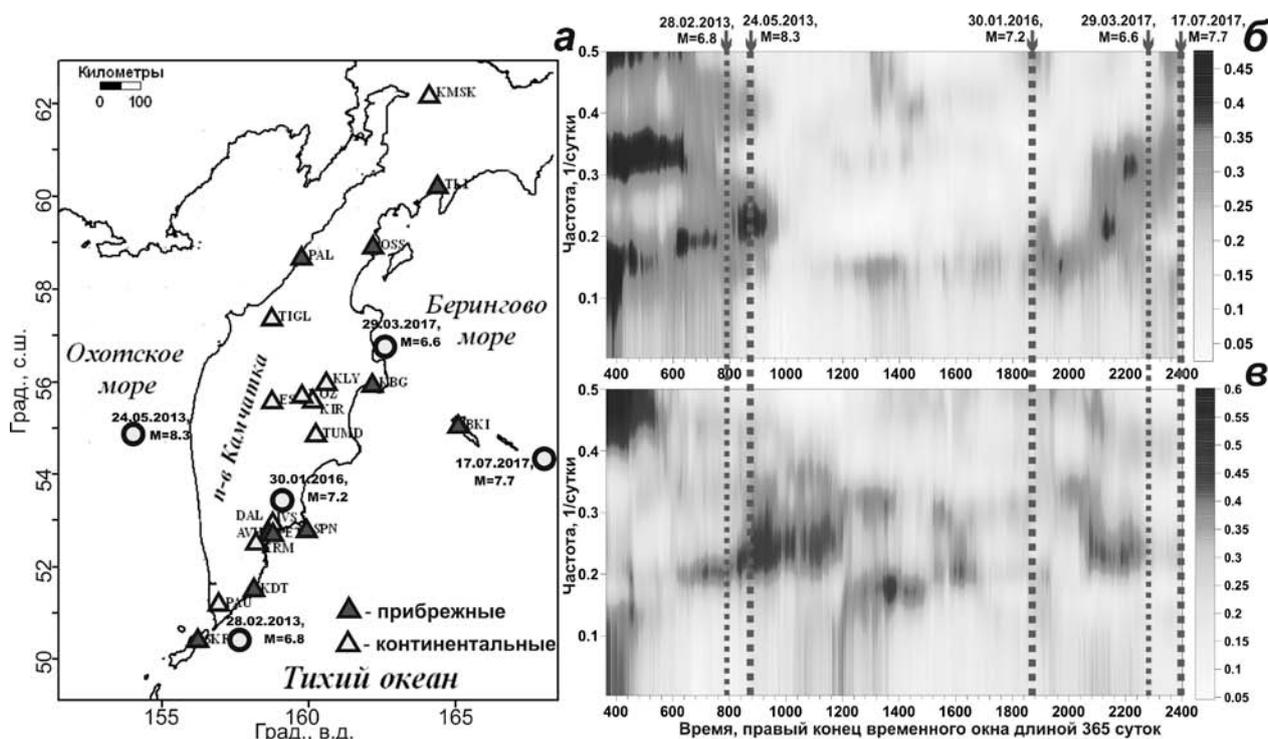


Рис. 4. Карта расположения эпицентров землетрясений (табл., кружки), прибрежных (выделены серым цветом) и континентальных (белый цвет) сейсмических станций (а); частотно-временные диаграммы эволюции спектральной меры когерентности $v_{max}(\tau, \omega)$ 4-хмерного ряда медианных значений параметров ФСШ для континентальной (б) и прибрежной (в) групп станций

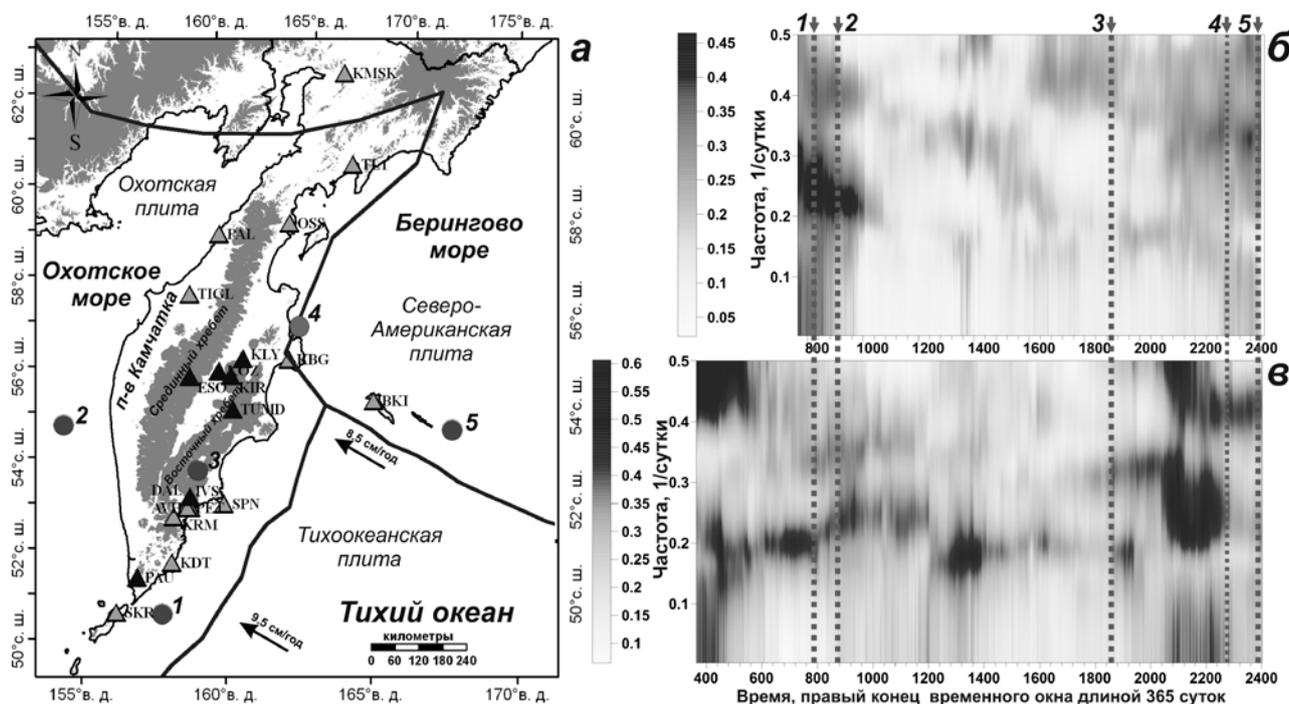


Рис. 5. Карта расположения эпицентров землетрясений (табл., кружки) и вулканических поясов. Станции в районах активного вулканизма выделены черным цветом, станции в невулканических районах показаны серым цветом (а); частотно-временные диаграммы эволюции спектральной меры когерентности $v_{max}(\tau, \omega)$ 4-хмерного ряда медианных значений параметров ФСШ для «вулканической» (б) и «не вулканической» (в) групп станций.

Обсуждение результатов

С использованием карт распределения параметров ФСШ за периоды времени 6–3 мес. рассмотрены их пространственно-временные особенности перед сильными землетрясениями 2013–2017 гг. (рис. 2). Заключение об особенностях поля ФСШ основывались на сопоставлении полученных карт (рис. 2 б, в, з) с картами за весь период наблюдений, которые рассматривались в качестве фоновых (долговременных) характеристик распределения параметров (рис. 2а).

Обнаружено, что перед землетрясениями 2013, 2016 и 2017 гг. наблюдались характерные изменения параметров ФСШ вблизи их очагов - понижение величин α^* , $\Delta\alpha$, и β и рост величины En . При этом Ближне-Алеутское землетрясение 17 июля 2017 г. произошло в районе, выделенном на всех картах за 2011–2017 гг., как наиболее опасном для возникновения одного или нескольких сильных землетрясений с $M \geq 7.5-8.0$ [3, 11] (рис. 2).

Было также обнаружено, что перед событиями 2013 и 2016 гг. наблюдались характерные изменения рассматриваемых параметров шума - перед землетрясениями 28 февраля 2013 г. и 30 января 2016 г. в области их будущих очагов фиксировалась область пониженных значений α^* , $\Delta\alpha$, β и повышенных значений En в течение не менее трех месяцев (рис. 2 б). В изменениях медианных значений параметров ФСШ было обнаружено монотонное уменьшение величин α^* , $\Delta\alpha$, β и повышение величины En в течение примерно 7 мес., предшествующих землетрясениям 2013 и 2016 гг. (рис. 3 а). Отметим, что характер поведения статистик ФСШ перед камчатскими землетрясениями в общем виде соответствовал их вариациям в периоды подготовки сильнейших землетрясений в районе Японии.

По результатам изучения эффектов когерентности в изменениях статистик ФСШ по всей сети станций, максимальный эффект повышенной когерентности проявился в диапазоне периодов 4–5.5 сут с октября 2012 по середину августа 2013 г. в течение 10–11 мес. и соответствовал времени подготовки и реализации землетрясений 2013 г. (рис. 3 б). При этом для северной группы станций эффект значимого изменения когерентности в поведении параметров ФСШ не наблюдался. Для центральной группы станций эффект увеличения когерентного поведения параметров ФСШ соответствовал времени подготовки и реализации событий 2013 г. По южной группе станций слабые всплески повышенной когерентности прослеживаются на интервале времени с середины апреля 2013 (за 1.5 мес. перед Охотоморским землетрясением) по конец июня 2015 гг. При этом максимальный эффект увеличения когерентности проявлялся с 15 сентября 2016 по конец февраля 2017 гг. Всплеск повышенной когерентности также прослеживался с середины мая по конец июля 2017 г., т. е. за 2 мес. перед землетрясением 17.07.2017 г.

На диаграммах эволюции четырехмерных временных рядов медианных значений параметров α^* , $\Delta\alpha$, En , β , построенных для группы континентальных и группы прибрежных станций, наблюдаются всплески увеличения когерентного поведения на периодах 3.5–5 сут с середины апреля по середину августа 2013 г., т.е. за 1.5 мес. перед Охотоморским землетрясением и в течение афтершоковой активности. Выраженный максимум $\nu(\tau, \omega)$ с 15 сентября 2016 по конец февраля 2017 гг. также обнаруживается на обеих диаграммах (рис. 4 б, в) и соответствует времени проявления максимума на диаграмме, построенной для южной группы станций (рис. 3 в, нижняя).

На диаграммах эволюции $\nu(\tau, \omega)$, построенных для группы «вулканических» станций, наблюдается всплеск когерентности в диапазоне периодов 3.3–5 сут с 01.01.2013 по 01.08.2013 гг., который соответствует времени подготовки и реализации землетрясений 2013 г., а также, возможно, времени повышенной вулканической деятельности. В это время происходили извержения вулканов Шивелуч, Толбачик и Кизимен. Для других интервалов времени эффекты увеличения когерентности в изменениях статистик шума в связи с извержениями вулканов не обнаруживаются. Это показывает, что влияние вулканической активности проявляется слабо в эффектах увеличения когерентности в изменениях параметров ФСШ.

Заключение

Представлен способ слежения за динамикой поля фонового сейсмического шума на Камчатке с использованием непрерывных временных рядов статистических параметров α^* , $\Delta\alpha$, β и En , включающий построение карт их пространственного распределения за различные интервалы времени, графиков изменения медианных значений по сети станций и частотно-временных диаграмм эволюции спектральной меры их когерентного поведения.

Обнаружены характерные изменения параметров ФСШ за несколько месяцев до возникновения на Камчатке сильных ($M=6.6-8.3$) землетрясений, проявляющиеся в относительном уменьшении величин α^* , $\Delta\alpha$, β и в увеличении En в области очагов.

Главной особенностью проявления эффектов синхронизации параметров ФСШ является увеличение спектральной меры когерентного поведения четырехмерного временного ряда параметров α^* , $\Delta\alpha$, β и En на периодах 3.5-5 сут за 5-8 месяцев до возникновения сейсмических событий 2013 г., включающих сильнейшее Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г., $M=8.3$.

Результаты сопоставления когерентного поведения параметров ФСШ по всей сети станций и по группам станций могут быть использованы для уточнения районов возникновения сильных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00133 «Оценка флуктуаций сейсмической опасности на основе комплексного анализа собственного шума Земли» (руководитель А.А. Любушин).

Литература

1. Иванов В.Ю., Касимова В.А. Создание макета ГИС-проекта «Петропавловский геодинамический полигон» для информационного обеспечения системы комплексных геофизических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2009. №1. Вып. №13. С.208–213.
2. Касимова В.А. Пространственно-временные вариации фонового сейсмического шума на Камчатке в 2011-2015 гг. // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Матер. четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ, 2015. Т. 1. С. 144–153.
3. 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.81–95.
4. Касимова В.А., Копылова Г.Н., Таранова Л.Н. Временные ряды данных непрерывной регистрации на широкополосных сейсмических станциях Камчатки и их структура // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Междунар. сейсмологической школы.- Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 169–173.
5. Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. Активная разломная тектоника юга центральной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 10–27.
6. Любушин А.А. Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997-2012 // Физика Земли. 2014. № 3. С. 18–27.
7. Любушин А.А. Карты свойств низкочастотных микросейсм для оценки сейсмической опасности // Физика Земли. 2013. № 1. С. 11–20.
8. Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. 2008. № 4. С.17–34.
9. Любушин А.А. Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. №8. С.23-33.
10. Любушин А.А. Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // Физика Земли. 2010. № 6. С. 86–96.
11. 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. Серия науки о Земле, 2015. №2. Вып. №26. С. 20–36.
12. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$ на границе Командорской сейсмической брешы // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2017. №. 3. Вып. №35. С. 22–25.
13. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2003. V. 4. No. 3. P. 1027. doi: 10.1029/2001GC000252.