

УДК 550.34

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ФОНА НА КАМЧАТКЕ

Беседина А.Н.

*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва,
besedina.a@gmail.com*

Введение

С развитием сейсмических сетей стали активно проводиться оценки состояния геосреды по параметрам регистрируемого микросейсмического шума; в том числе и с точки зрения поиска предвестников сильных землетрясений. Учитывая предполагаемую связь свойств микросейсмического шума с геологическим строением среды, грунтовыми условиями, а также с напряженным состоянием массива, многие исследователи используют характеристики шумов в качестве предвестников сейсмических событий [5–7, 15, 16].

Высокочастотный сейсмический шум (ВСШ) в частотном диапазоне первых десятков Гц рассматривается в качестве прогностического признака процесса подготовки землетрясения. На основе долговременных сейсмических наблюдений на Камчатке показана синхронизация выделенной из ВСШ приливной компоненты с волной гравитационного приливного потенциала [4, 8]. В [4] отмечено наличие характерного предвестника в высокочастотном диапазоне частот за 2 месяца перед сейсмическими событиями с $M \geq 5$ на эпицентральной дистанции до 400 км. Авторы [8] связывают физический механизм фазовой синхронизации высокочастотного сейсмического шума с возможным развитием приповерхностных зон дилатансии. [16] при анализе микросейсмического шума в диапазоне 2–25 Гц отметили, что спектры микросейсмического шума в окрестности будущего (неглубокого) землетрясения заметно изменяются за один-два дня до события, что может служить краткосрочным предвестником землетрясения.

Низкочастотные импульсные сигналы, которым уделено внимание в работах ряда исследователей (Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян, Б.В. Левин, А.А. Любушин, Г.А. Соболев и др.) могут нести уникальную информацию о напряженно-деформированном состоянии крупных блоковых структур и представлять значительный интерес в качестве прогностического признака сильных землетрясений. Так, например, низкочастотные колебания, регистрируемые перед сильными землетрясениями в диапазоне периодов от нескольких минут до десятков минут, описаны в работах [12, 13]. Было установлено, что в этом диапазоне периодов перед Кроноцким и Нефтегорским землетрясениями возникали отдельные импульсы как симметричной, так и асимметричной формы, а промежутки времени между последовательными импульсами на некоторых интервалах демонстрировали периодичность. По мере приближения момента землетрясения усиливалась асимметрия формы импульсов, характеризующаяся разной амплитудой фаз положительной и отрицательной полярности, и частота и регулярность асимметричных импульсов возрастали [12, 13]. На записях, зарегистрированных в течение суток после Кроноцкого землетрясения, низкочастотные колебания с периодом более 10 мин исчезли, что, как считают авторы [12], свидетельствует о связи их появления с процессом подготовки землетрясения. Характерные признаки подготовки землетрясения сильно отличаются в каждом сейсмоактивном регионе, т. к. характер сейсмичности каждого региона в значительной степени зависит от многих факторов, в т.ч. от строения земной коры и тектонических условий [9]. Исследование структуры сейсмического фона позволяет говорить о наличии в микросейсмическом фоне как низкочастотных импульсных колебаний, имеющих нестационарный характер, так и квазистационарных участков [2].

Смещение спектра специфических низкочастотных микросейсм в длиннопериодную область может оказаться одним из возможных проявлений снижения жесткости разломной зоны перед динамическим срывом [3]. Подобные эффекты наблюдались Г.А. Соболевым и А.А. Любушиным перед несколькими землетрясениями [10]. Наиболее ярко это явление проявилось перед землетрясением с магнитудой $M = 9.2$ на о. Суматра 26.12.2004 года, где период таких колебаний, появившихся более, чем за двое суток до главного толчка, стремительно увеличивался по мере приближения события. В работе [14] на основе анализа параметров низкочастотного микросейсмического шума в Чилийской зоне субдукции проведено выявление процесса перехода разломной зоны в метастабильное состояние. Перед тремя крупными землетрясениями (M_w , 8.8 Maule

2010, M_w 8.2 Iqiuque 2014 и M_w 8.3 Шапел 2015) наблюдался эффект снижения спектрального центраида перед основным событием.

В данной работе выполнено исследование микросейсмического фона на Камчатке с 2008 по 2018 года. Проведено исследование параметров низкочастотного микросейсмического фона как до, так и после землетрясений в этой области.

Методика и данные

Для анализа были привлечены данные сейсмической станции РЕТ международной сейсмической сети IRIS (<http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/forms/breqfast-request/>). Выборка землетрясений и их основных параметров проводилась по данным сейсмического каталога USGS Earthquake catalog (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>).

Сначала проводилась оценка вариаций микросейсмического фона. С учетом того, что удобным индикатором изменения жесткости системы «блок-разлом» является изменение частоты колебаний [1], для количественной характеристики микросейсмического фона и оценки характерной частоты колебаний был использован алгоритм центра масс. Согласно теоретическим оценкам, ожидаемые частоты колебаний блоков могут находиться в диапазоне от 0.03 Гц до 0.3 Гц [14]. В ходе анализа была проведена оценка спектрального центраида f_c в диапазоне частот 0.008–0.45 Гц – средневзвешенного значения частот, присутствующих в сигнале. Данный выбор частот обусловлен желанием исключить основные моды собственных колебаний Земли, но при этом придерживаться единого частотного диапазона для землетрясений с магнитудой больше 6. Полученные среднегодовые вариации шума показаны на рис. 1. Значения f_c соответствуют частотному диапазону первичных и вторичных микросейсм.

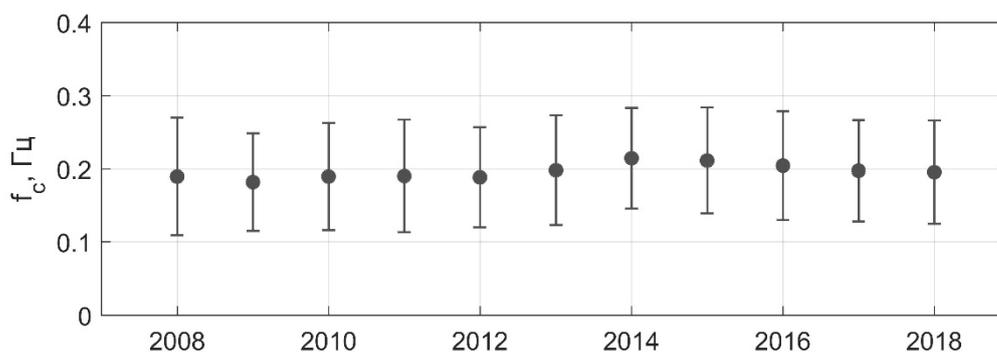


Рис. 1. Среднегодовые значения спектрального центраида (f_c) в диапазоне частот 0.008–0.45 Гц для сейсмической станции РЕТ. Отрезками показано среднеквадратичное отклонение σ

Помимо долгосрочного анализа микросейсмического фона, проводилось исследование результатов регистрации микросейсм до и после сильных землетрясений. Отбор событий для анализа микросейсмического фона перед землетрясениями проводился по следующим признакам: события с $M_w \geq 6$, эпицентральной расстоянием R до станции РЕТ в пределах ~ 6 размеров очага и глубиной очага до 200 км. Таким образом, в выборку попали 7 сильных событий, для которых регистрирующая станция находилась в ближней зоне очага землетрясения (табл. 1). Для событий с $6 \leq M_w < 7$ эпицентральные расстояния рассматривались до 200 км, для $7 \leq M_w < 8$ до 600 км, а для землетрясений с $M_w \geq 8$ диапазон выбранных эпицентральные расстояний доходил до 1800 км. Из-за ограничения землетрясений по глубине очага d из выборки были исключены три глубокофокусных землетрясения: Охотоморское землетрясение с M_w 8.3 2013 года, а также еще два землетрясения, произошедшие в 2008 году с M_w 7.7 и 7.3.

В ходе исследования параметров сейсмического фона выделены 5 землетрясений, перед которыми наблюдается понижение спектральной частоты df_c на 0.02–0.2 Гц в течение времени T от 2 до 4 часов (табл. 1). При этом для событий № 3 и 4 из табл. 1 время в очаге отличается менее, чем на 5 часов. Поэтому эффект восстановления спектрального центраида после события № 3 накладывается на процессы подготовки землетрясения № 4.

Поскольку случаи наложения двух или более землетрясений во времени происходят достаточно часто, дополнительно проводилось исследование параметров микросейсмического шума после землетрясений. Для этого рассматривалась вторая выборка, в которую вошли события за 2008–2018 года с $M_w \geq 7$ как локальные, так и телесейсмические.

Таблица 1. Выборка землетрясений для анализа микросейсмического фона до землетрясений.

№	Дата	M_w	R , км	d , км	df_c , Гц	T , ч
1	30.07.2010	6.3	100	23	0.18	4
2	19.05.2013	6.1	122	18	0.07	4
3	21.05.2013	6.0	128	30	0.02	2
4	21.05.2013	6.1	127	30	-	-
5	30.01.2016	7.2	106	177	0.18	2
6	06.07.2018	6.1	178	45	0.2	2
7	20.12.2018	7.3	458	17	-	-

Для количественной оценки характеристик шума введены два параметра: длительность Θ , который соответствует интервалу времени, для которого последовательные значения спектрального центра ниже $\langle f_c \rangle - \sigma$, и площадь Σ , который соответствует площади этого участка под кривой. Каждому интервалу снижения спектрального центра ниже $\langle f_c \rangle - \sigma$ ставилась в соответствие магнитуда наибольшего землетрясения, произошедшего за данный интервал снижения. Полученные значения параметров Θ и Σ , рассчитанные за 2008-2018 года по данным станции РЕТ, показаны на рис. 2.

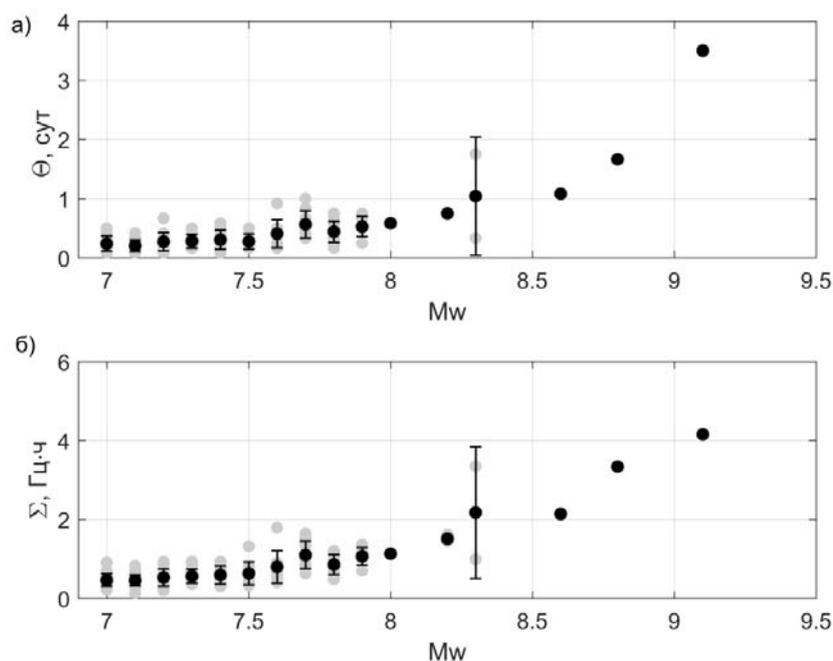


Рис. 2. Параметр Θ (а) и Σ (б), рассчитанные за 2008–2018 года по данным станции РЕТ (серые точки), для землетрясений с $M_w \geq 7$. Черные точки – усредненные значения по всем данным для каждого значения магнитуды с шагом 0.1

Обсуждение результатов

Снижение спектрального центра f_c перед землетрясениями на 0.02–0.2 Гц для Камчатки оказывается ниже, чем значения f_c , полученные для Чилийской зоны субдукции, для которой наблюдается эффект снижения частоты на 0.12–0.26 Гц перед землетрясениями за те же года с 2008 по 2018 [14]. Стоит отметить, что для Камчатки в выборку попали землетрясения с $M_w = 6.0 - 7.2$, когда для Чили отмеченное снижение f_c получено для мега-землетрясений с $M_w = 8.2 - 8.8$.

Значения параметра Θ по данным Камчатки возрастает от ~ 6 часов для землетрясений с $M_w = 7.0$ до $\Theta = 3.5$ сут для событий с $M_w = 9.1$. Зависимость хорошо описывается степенной функцией $\Theta = 10^{-9} \cdot M_w^{9.8}$ с коэффициентом детерминации 0.95. Изменение параметра площадь Σ с увеличением магнитуды события также хорошо описывается степенной функцией $\Sigma = 1.4 \cdot 10^{-8} \cdot M_w^{8.8}$ с коэффициентом детерминации 0.97 и изменяется от 0.46 Гц·ч до ~ 4 Гц·ч. Стоит отметить, что отмеченные выше зависимости хорошо согласуются с результатами, полученными для Чилийской

зоны субдукции. При этом изменение параметров для локальных и телесеismicических землетрясений описывается одинаковыми функциями и не зависит от пространственного расположения очагов.

Исследование спектральных характеристик шума в более низкочастотном диапазоне 0.0017–0.0033 Гц рассмотрено в работе [11]. При анализе параметров шума по записям нескольких широкополосных станций отмечено повышение меры когерентности после землетрясений с магнитудами более 7 на эпицентральных расстояниях более тысячи километров, что авторы [11] связывают с влиянием собственных колебаний Земли.

Одинаковые зависимости, полученные в данной работе, для близких и удаленных землетрясений говорят в пользу того, что полученный эффект снижения спектрального центроида после землетрясений связан с вкладом собственных колебаний Земли несмотря на то, что при обработке данных использовался диапазон частот выше 0.008 Гц (тем самым было исключено влияние основных мод собственных колебаний Земли).

Заключение

Проведено долговременное исследование параметров микросейсмического шума для Камчатки. Получены среднегодовые вариации спектрального центроида шума в диапазоне 0.008–0.4 Гц. Для некоторых землетрясений отмечено снижение спектрального центроида за 2–4 часа до основного события на 0.02–0.2 Гц. Исследование параметров шума после землетрясений показало, что наблюдается смещение спектрального центроида до 4.5 суток для землетрясений с магнитудой около 9. Полученные результаты для Камчатки, рассчитанные по данным станции РЕТ, качественно согласуются с результатами, полученными ранее для Чилийской зоны субдукции.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0146-2017-0006) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00923).

Список литературы

1. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
2. Кочарян Г.Г., Кабыченко Н.В. Проявление блоковых движений в длиннопериодном сейсмическом фоне // Сборник научных трудов ИДГ РАН: Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Книга 1. М.: ГЕОС, 2003. С. 98–107.
3. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Изменение жесткости разломной зоны в ходе сейсмического цикла // Доклады Академии Наук. 2011. Т. 441. №3. С. 384–387.
4. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А. Сравнение отклика сейсмических шумов на приливы по данным станций «Шикотан», «Начики», «Карымшина» // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции, 17–18 января 2006 г., Петропавловск-Камчатский / Отв. Ред. В.Н. Чебров, Г.Н. Копылова – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2006. с.114–121.
5. Любушин А.А. Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 6. С. 26–34.
6. Любушин А.А. Связь полей низкочастотных сейсмических шумов Японии и Калифорнии // Физика Земли. 2016. №6. С. 28–38.
7. Салтыков В.А. Механизм приливных эффектов в сейсмичности на основе модели амплитудно-зависимой диссипации // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 5. С. 103–110.
8. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений (по материалам долговременных режимных наблюдений на Камчатке) // Физика Земли. 2007. № 9. С. 48–60.
9. Сасорова Е.В., Левин Б.В. Низкочастотные сейсмические сигналы, как региональные признаки подготовки землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 126–133.
10. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.
11. Соболев Г.А. Сейсмический шум. М.: ООО «Наука и образование», 2014. 272 с.
12. Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2005. № 8. С. 3–27.
13. Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений // Физика Земли. 2006. № 9. С. 5–17.
14. Besedina A.N., Ostapchuk A.A. Parametric analysis of the low-frequency seismic noise as the basis for monitoring changes of the stress-strain state of rock // AIP Conference Proceedings. 2018. N. 2051. P. 020030, doi: 10.1063/1.5083273.
15. Lyubushin A.A. Synchronization trends and rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseismic // Iz. Phys. Solid Earth. 2009. N. 45. P. 381–94.
16. Sovic I., Sariri K., Zivcic M. High frequency microseismic noise as possible earthquake precursor // Research in Geophysics. 2003. V. 3. N. 1. P. 8–12. doi 10.4081/rg.2013.e2.