

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА
В СКВАЖИНЕ НИС-1 В ИЮЛЕ-АВГУСТЕ 2003 ГОДА

А.Б. Тристанов¹, О.П. Руленко², П.П. Фирстов²

¹ Камчатский государственный педагогический университет, Петропавловск-Камчатский, 683000, Россия e-mail: neringa@mail.iks.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия e-mail: rulenko@kcs.iks.ru, firstov@kcs.iks.ru

Исследования Л. Н. Рыкунова с коллегами [1-4], начатые в середине 70-х годов XX века, показали, что в спектре регионального сейсмического шума на частотах в первые десятки Гц существуют определенные участки или узкие полосы, которые очень чувствительны к деформирующим земную кору длиннопериодным процессам (приливы, собственные колебания Земли, слабая сейсмичность и т. д.). Это позволяет использовать сейсмический шум (в том числе и со значительной антропогенной составляющей при применении специальных методов анализа сигнала) в качестве канала информации об этих процессах. В частности, метод наблюдения и анализа шума как чувствительного процесса, который отражает локальное напряженное состояние земной коры, перспективен для использования в задачах оперативного и краткосрочного прогноза землетрясений [6]. С целью уменьшения техногенных влияний при наблюдениях за сейсмическим шумом измерительная аппаратура помещается обычно на некоторую глубину в землю (шахта или скважина).

Основываясь на этом, для выяснения шумовой обстановки и возможности проведения режимных наблюдений, направленных на обнаружение предвестников землетрясений, в июле-августе 2003 года были проведены пробные наблюдения за сейсмическим шумом в скважине НИС-1. Скважина расположена вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и имеет глубину 350 метров. На всю длину она обсажена стальными трубами, внутренний диаметр которых до глубины 167 метров равен 204 мм. На глубине 16 метров в скважине находится «пробка», состоящая из камней и техногенного мусора. Сейсмоприемник СВ-10 был закреплен на металлическом цилиндре диаметром 100 и высотой 80 мм, который помещен осесимметрично относительно обсадной трубы на эту «пробку» (рис.1). Наличие металлического цилиндра обеспечивало более надежный механический контакт сейсмоприемника с «пробкой» и далее с обсадной трубой, которая рассматривалась в эксперименте как длинная антенна, воспринимающая сейсмический шум.

Сигнал с сейсмоприемника, пропорциональный скорости вертикального смещения, подавался через усилитель на 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь и оцифровывался с частотой 128 Гц. Полученная информация записывалась на жесткий диск персональ-

ного компьютера. Измерительный канал имел в целом амплитудно-частотную характеристику, близкую к резонансной с максимальным усилением на частоте 5-6 Гц ~ 80000 . Наблюдения за сейсмическим шумом проводились сеансами длительностью от одних до нескольких суток.

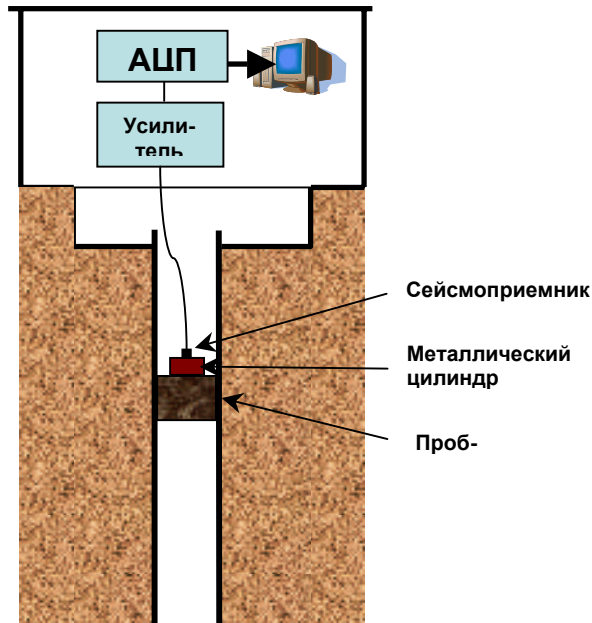


Рис.1. Схема регистрации сейсмического шума на скважине НИС-1.

С помощью системы MATLAB исследовалась частотно-временная структура зарегистрированного сигнала. Использовалось кратковременное преобразование Фурье, которое в отличие от классического преобразования Фурье дает информацию не только о спектре, но и о его динамике. Метод заключается в разбиении исследуемого сигнала на фрагменты (возможно, с перекрытием) и вычислении для каждого из них дискретного преобразования Фурье.

Набор спектров всех фрагментов образует спектрограмму [5]. Основу данного метода составляет интегральное преобразование вида

$$Sf(\omega, x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-x)e^{-j\omega t} dt,$$

называемое кратковременным (оконным) преобразованием Фурье (КВПФ), где $g(t)$ – функция-окно. $Sf(\omega, x)$ обеспечивает получение локальной информации о спектре сигнала. Для $Sf(\omega, x)$ может быть введено понятие частотно-временного окна с шириной во временной области

$$\sigma_t^2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |g(t)|^2 dt \text{ и в частотной } \sigma_\omega^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |G(\omega)|^2 d\omega.$$

Показано [7], что $\sigma_t \sigma_\omega \geq 0.5$, причем равенство достигается, если $g(t)$ есть функция Гаусса. Таким образом, КВПФ обладает конечным частотно-временным разрешением, зависящим от выбора функции-окна $g(t)$.

Введем три частотные характеристики $g(t)$ (рис. 2,а):

1. Ширина основного лепестка $\Delta\omega$, определяемая как

$$\frac{\left|G\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)\right|^2}{|G(0)|^2} = \frac{1}{2}.$$

2. Максимальная амплитуда первого бокового лепестка A , дБ

$$A = 10 \lg \frac{|G(\omega_0)|^2}{|G(0)|^2}.$$

3. Порядок асимптотического затухания боковых лепестков p

$$|G(\omega)| = O(\omega^{-p-1}).$$

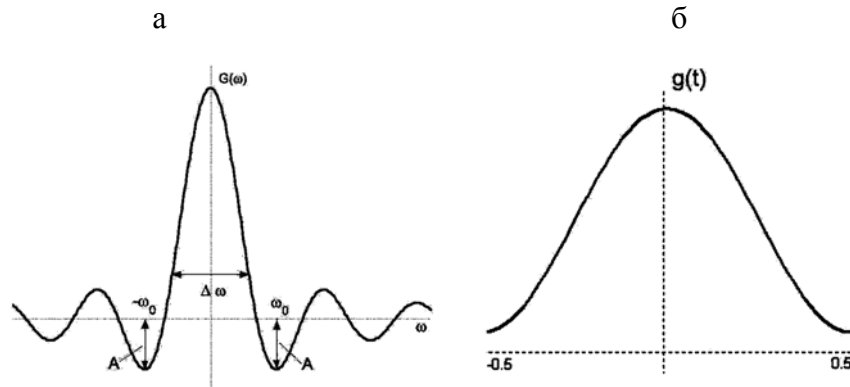


Рис.2. Частотные характеристики функции-окна (а) и окно Хэмминга (б).

Рассмотрим роль этих характеристик в выборе функции-окна $g(t)$ [7]. Пусть исследуемая функция имеет вид $f(t) = e^{j\xi_0 t}$. Если $\Delta\omega$ мало, то энергия сигнала сконцентрирована в окрестности $\omega = \xi_0$. Боковые лепестки спектра окна приводят к появлению боковых лепестков спектра сигнала, которыми можно пренебречь, если A мало. Быстрое затухание боковых лепестков спектра окна обеспечивает более четкое выделение гармонических составляющих.

При проведении расчетов использовались дискретные преобразования. Дискретное КВПФ сигнала f имеет вид

$$Sf[m, l] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n]g[n-m]e^{-j\frac{2\pi ln}{N}}.$$

Для каждого $0 \leq m < N$ $Sf[m, l]$ определяется следующим образом: для каждого $0 \leq l < N$ определяется спектр $f[n]g[n-m]$ с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ), вычисленного, например, с использованием алгоритма БПФ.

При исследовании сигнала было выбрано окно Хэмминга $g(t) = 0.54 + 0.46 \cos(2\pi t)$ с $\Delta\omega = 1.36$, $A = -43$ дБ, $|\hat{g}(\omega)| = O(\omega^{-1})$ (рис.2,б). Спектрограмма строилась со следующими параметрами: ширина окна 1024 точки, перекрытие окон 50%, рассчитывалось 2048 точек БПФ.

На рис.3 приведены спектрограммы исследуемого сигнала. Высокая нагруженность спектрограмм объясняется большим уровнем техногенных помех сейсмического, а так же

электрического происхождения. Последние являются «наводками» на измерительный канал и имеют постоянный, локализованный по частоте спектр. Такие сигналы не рассматривались.

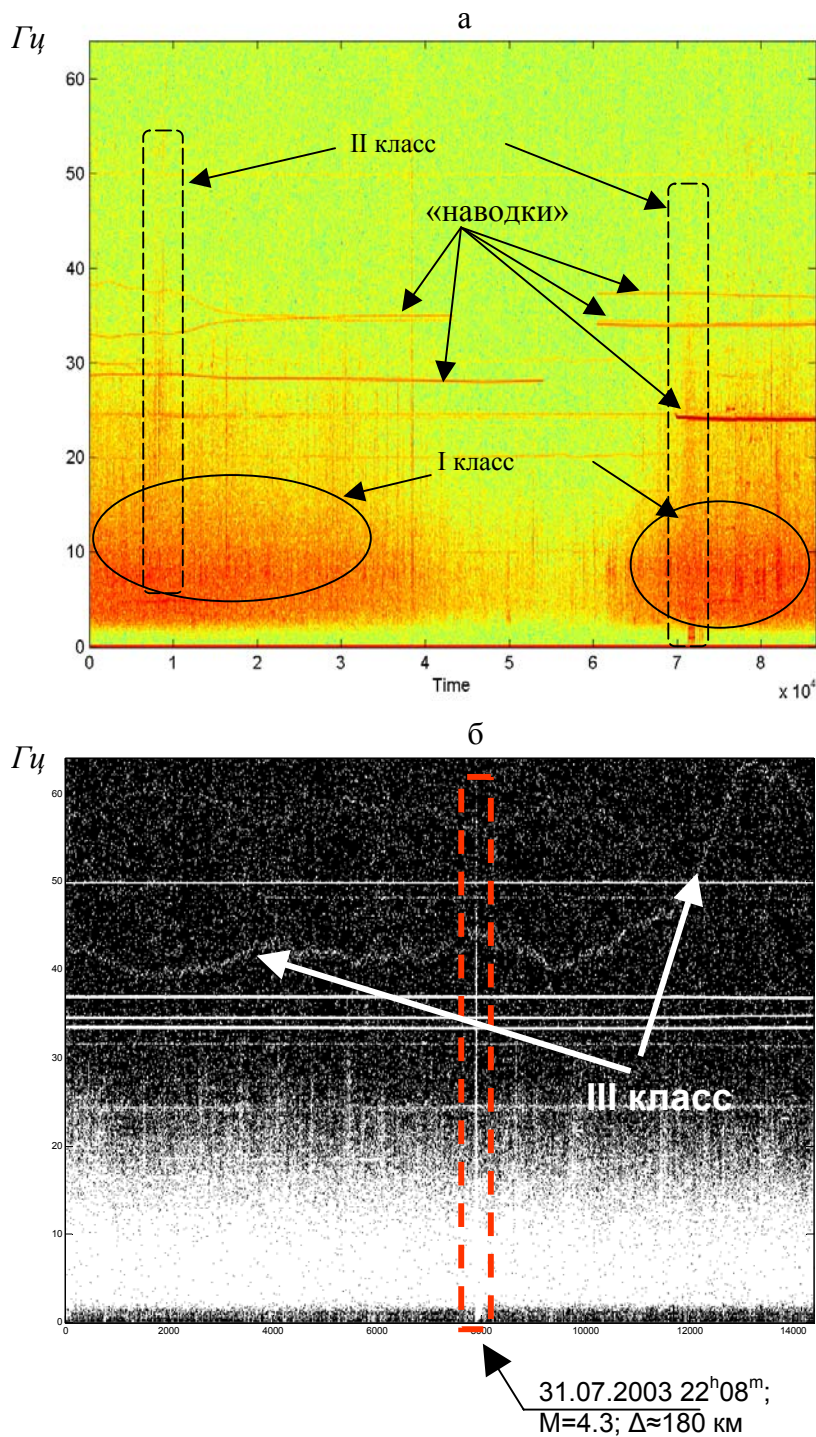


Рис.3. Спектрограммы сейсмического шума: типовая (а) и с сигналом от землетрясения (выделен пунктиром) (б).

Визуально на спектрограммах можно выделить 3 класса шумов:

- **I класс** - широкополосный низкочастотный шум с максимумом на частотах 4-8 Гц. Интенсивность этого шума снижалась в ночное время, что связано с уменьшением уровня техногенных помех;

- **II класс** - значительные по уровню широкополосные шумы, локализованные по времени;
- **III класс** - шумы, представляющие собой локализованный и флуктуирующий по частоте сигнал.

Сигналы III класса, в отличие от I и II классов, не имели явного техногенного происхождения и требуют дополнительного исследования. С целью дальнейшего выделения сигналов этого класса необходимо построить модель фоновых (по отношению к выделяемому) шумов. Шумы II класса носят событийный характер и поэтому должны рассматриваться отдельно.

Для построения модели шумов I класса была проведена оценка их параметров, которая заключалась в исследовании динамики мощности шума. С этой целью сигнал за сутки был разбит на 12 частей, длительностью по 2 часа. Непараметрическим методом усреднения модифицированных периодограмм (методом Уэлча) [5] была оценена спектральная плотность мощности каждой части. Этот метод не требует априорных знаний о сигнале и использует только информацию, содержащуюся в отсчетах сигнала. Он заключается в разбиении сигнала на перекрывающиеся фрагменты и расчете для каждого из них модифицированной периодограммы с дальнейшим усреднением. Благодаря перекрытию фрагментов, данный метод обеспечивает минимум дисперсии оценки спектра плотности мощности сигнала по сравнению с другими методами.

Исследовался типичный сигнал, зарегистрированный 15 августа 2003 г. Спектрограмма этого сигнала представлена на рис.4.

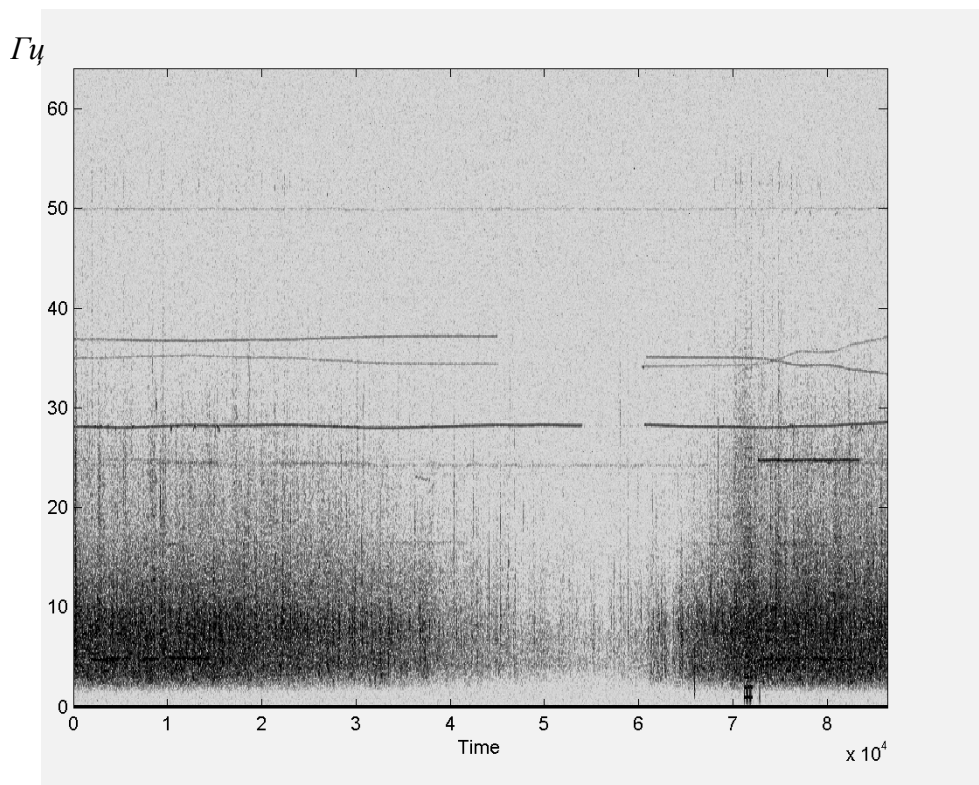


Рис.4. Спектрограмма сейсмического шума, зарегистрированного 15 августа 2003 г.

В таблице приведена последовательность типовых спектров, позволяющая проследить их динамику. На спектрах можно выделить несколько характерных точек (рис.5). Более слабой линией на рис.5 обозначен средний спектр мощности сигнала.

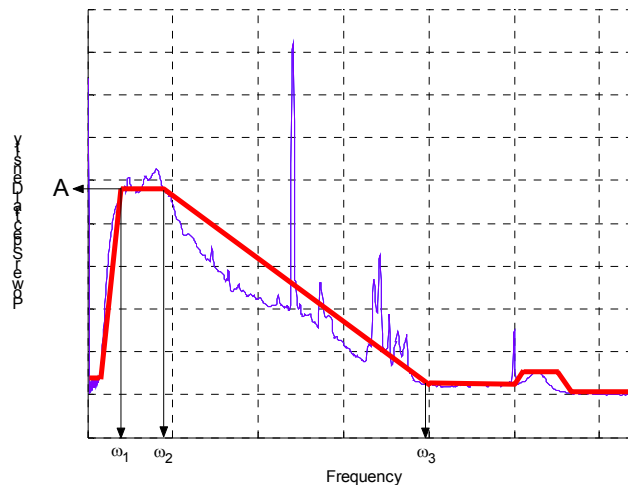


Рис.5. Характерные точки спектральной плотности мощности сигнала.

Можно заметить (см. табл.), что ω_1 и ω_2 не меняют своего положения, а ω_3 изменяется по некоторому закону с периодом в ~ 1 сутки. Уровень A в точках ω_1 и ω_2 также меняется пропорционально времени суток. Спад сигнала на участке между ω_2 и ω_3 происходит по нелинейному закону.

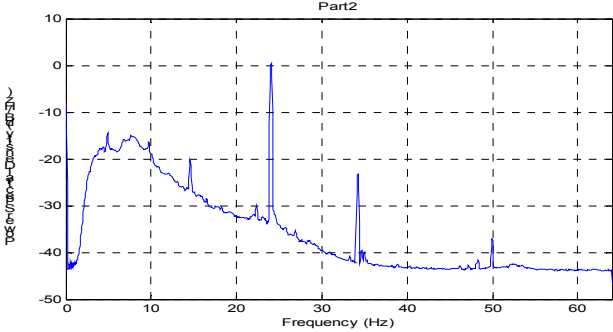
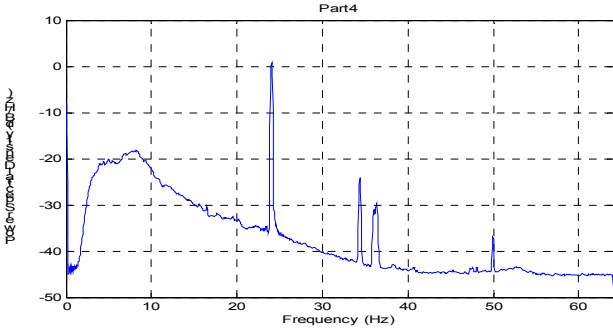
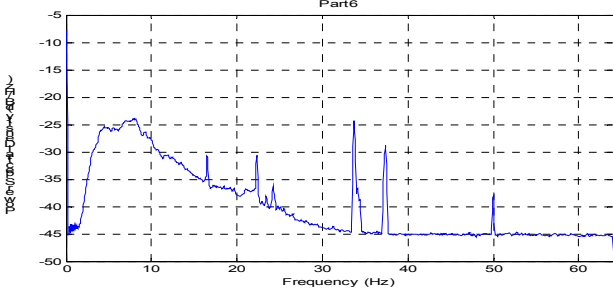
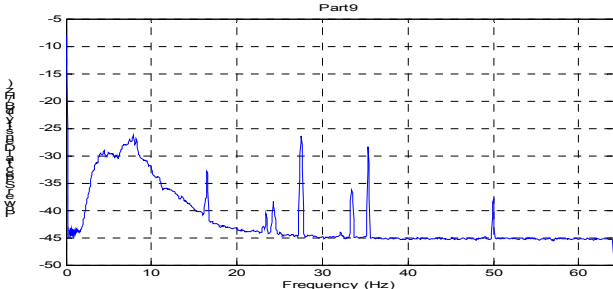
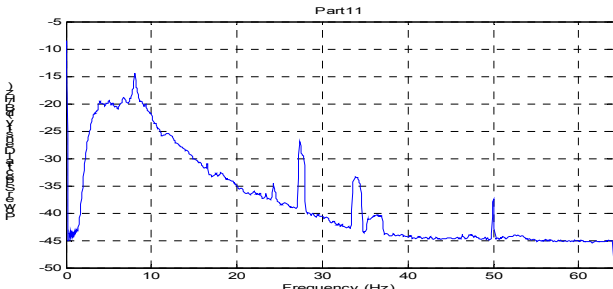
По имеющимся наблюдениям сигнал III класса лежит в диапазоне частот от ω_3 и выше, в том числе, предположительно, более 64 Гц (частоты Найквиста), о чем говорит отражение спектра от границы спектрограммы (эффект подмены частот). Более тонкое исследование требует детального анализа событий во время наблюдений.

В рамках исследований проведена регистрация сейсмического шума в скважине НИС-1 и выполнен предварительный частотно-временной анализ, предложена классификация компонент сигнала и рассмотрены некоторые особенности их динамики. Таким образом, наблюдения показали целесообразность дальнейших исследований особенностей сейсмического шума на скважине НИС-1 с применением предложенных в данной работе подходов.

Авторы выражают благодарность А.В. Гостевскому за участие в организации и проведении наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 02-05-64467.

Таблица. Спектральная плотность мощности сигнала, зарегистрированного 15 августа 2003 г.

Часы на- блюдения	Периодограмма Уэлча	Оценки пара- метров
3-4		$\omega_3 \sim 40$ Гц $A \sim -18$ дБ
7-8		$\omega_3 \sim 40$ Гц $A \sim -20$ дБ
11-12		$\omega_3 \sim 33$ Гц $A \sim -25$ дБ
17-18		$\omega_3 \sim 28$ Гц $A \sim -29$ дБ
21-22		$\omega_3 \sim 40$ Гц $A \sim -19$ дБ

Список литературы

1. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 11. С. 72-77.
2. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В., Видмонт Н. А. Модуляция высокочастотных сейсмических шумов при слабой сейсмичности Земли // Докл. РАН. 1998. Т. 358. № 2. С. 256-259.
3. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. Эффект модуляции сейсмических шумов Земли: 25 лет спустя // Наука и технология в России. 1999. № 5. С. 16-19.
4. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. Эффект модуляции сейсмических шумов Земли: 25 лет спустя; развитие // Наука и технология в России. 2000. № 1-2. С.11-14.
5. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
6. Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В., Видмонт Н. А. Проблема предсказания землетрясений: Результаты, обсуждение, предложения // Вестник ОГГТГН РАН. 2000. Т. 1. № 2. С.
7. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. - New York Academic Press, 1998. 529 p.