

УДК 621.398 + 550.34

О.К. Абрамов, В.М. Безуглов**ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
СЛАБЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Рассмотрены проблемы измерения слабых сейсмических сигналов в условиях повышенных техногенных шумов и микросейсм. Решение этих задач актуально для изучения сейсмического режима крупных промышленных центров.

1. Введение. Организация сейсмического мониторинга определенной территории предполагает, что объем и мощность потока сейсмологической информации с сети сейсмических измерительных пунктов (ИП), рассредоточенных на данной территории, определяются числом регистрируемых сейсмических событий (землетрясений), длительностью процесса регистрации, частотным и динамическим диапазонами сейсмических сигналов, общим числом каналов регистрации, а также точностью, с которой эта информация регистрируется и обрабатывается.

При организации сейсмологических наблюдений для выбора оптимальных отношений сигнал-шум регистрирующей аппаратуры необходимо знать амплитудно-спектральный состав сейсмических помех в пункте наблюдения и его изменение со временем. Наиболее полную информацию может дать непосредственное изучение фона помех в каждом ИП за *представительный промежуток времени* для каждого минимального *представительного сейсмического события (взрыва или землетрясения)*.

Сейсмические шумы и помехи в диапазоне частот 0,1 – 20 Гц можно разделить на две характерные группы: 1) помехи в области частот 0,1–1 Гц; 2) высокочастотные микросейсм от 1 Гц до 20 Гц и выше. В общих случаях [1] сюда могут входить индустриальные и транспортные шумы, ветровые помехи, помехи от горных рек и от колебаний воды в озерах, от морского прилива и т. д. Вклад каждого источника сильно меняется от места к месту и во времени, поэтому при точных сейсмологических наблюдениях желательно избавиться от всех возможных в данном месте сейсмических шумов. Это особенно важно для уверенной регистрации микроземлетрясений с амплитудами менее $10^{-7} - 10^{-5}$ м. Выход из создавшейся ситуации может быть найден с помощью специальных сейсмометров, опущенных в глубокие скважины. Так, заглубление

сейсμοприемника на глубину до 200 м дает выигрыш в отношении сигнал-шум в десятки раз. При дальнейшем заглублении градиент уменьшения шумов несколько ослабевает, однако, по утверждениям отдельных экспериментаторов [2], на глубине 600 – 800 м влияние мешающих факторов с “дневной поверхности” практически не ощущается. В этих условиях открываются перспективы создания сравнительно недорогих сейсмометрических установок с увеличениями до 500 000 и выше в диапазоне частот от 0,1 до 30 ÷ 50 Гц.

Данная работа ставит своей целью оценку эффективности сети (группы) сейсмостанций при регистрации слабых сейсмических сигналов в условиях присутствия техногенных шумов или естественных микросейсм.

Поскольку измерение слабых сейсмических сигналов с амплитудами $10^{-7} - 10^{-5}$ м на поверхности весьма затруднено, поставлена задача улучшения отношения сигнал-шум сейсμοизмерительных установок путем заглубления сейсμοприемников.

Одним из важных условий успешного решения обозначенных проблем является минимизация технических и трудовых затрат при реализации скважинных сейсμοизмерительных установок, что может быть достигнуто *оптимальным* заглублением скважинных сейсμοприемников, достаточным для уверенной регистрации сейсмических событий, *представительных* для данной сети сейсμοстанций, автоматизацией наблюдений с применением сейсмотелеметрии, внедрением перспективных малогабаритных сейсμοприемников и т. д.

Экспериментальные исследования проводились в одном из самых сейсμοактивных районов Земли – на территории Душанбинского геофизического полигона в Таджикистане (рисунок 1).

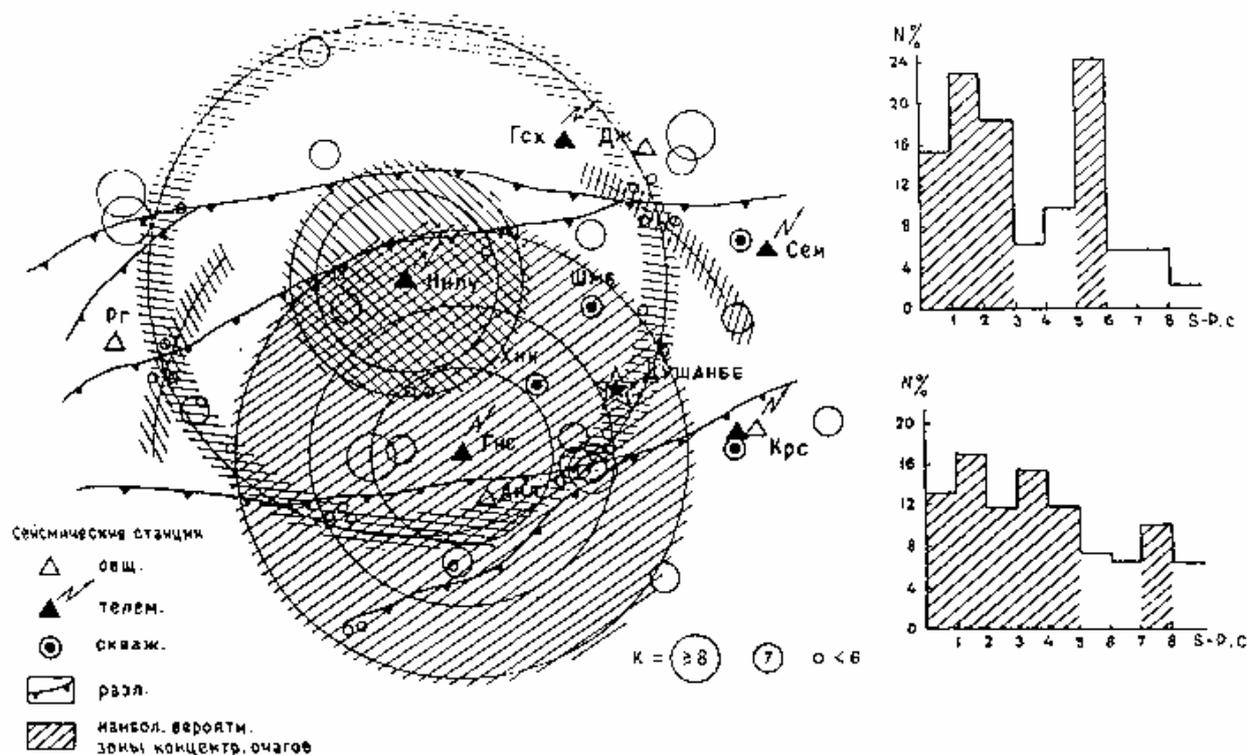


Рисунок 1 – Сейсмоизмерительная сеть Душанбинского геофизического полигона

2. Оценка эффективности сети сейсмических станций. Наиболее полная теория сейсмических групп была разработана в связи с созданием Экспериментальной Большой сейсмической группы (LASA) в США [3] и группы NORSAR в Норвегии [4]. Эти группы создавались для обнаружения подземных ядерных взрывов и регистрации слабых землетрясений от большого числа взаимосвязанных сейсмических датчиков. Эти большие сейсмические группы имеют очень сложную пространственную конфигурацию. Для обработки сейсмической информации должны быть применены мощные вычислительные средства.

Эксплуатация этих комплексов требует значительных материальных, интеллектуальных и трудовых ресурсов, что, вероятно, и предопределило их дальнейшую судьбу. В настоящее время эти сейсмометрические гиганты прекратили свое существование, однако накопленный научный опыт, методы регистрации и обработки сейсмометрической информации послужили поводом для многочисленных научных исследований по данной тематике, в том числе в нашей стране [5 – 7].

Для оценки эффективности реальной сейсмометрической сети, предназначенной для сейсмического мониторинга определенных территорий, следует для каждой станции установить осредненные зависимости относительного числа регистрируемых землетрясений от эпи-

центрального расстояния и энергетического класса событий. Эти зависимости позволяют определить расстояния, до которых данной станцией регистрируются землетрясения заданного (представительного) класса.

Схема наблюдательной сети Душанбинского геофизического полигона (ДГП), охватывающего центральную и периферийную части Гиссарской долины с окаймляющими предгорьями Гиссарского хребта и хребта Бабатаг, представлена на рисунке 1. Высокий уровень сейсмических шумов, вызванных жизнедеятельностью крупных промышленных центров, населенных пунктов и транспортных магистралей, ограничивает чувствительность сейсмометрической аппаратуры и затрудняет регистрацию местных слабых землетрясений практически по всей Гиссарской долине.

Действующие здесь сейсмические станции общего типа имеют сравнительно небольшое увеличение ($\bar{V}_{\max} \leq 10 \div 15$ тыс.) и их плотность недостаточна для уверенной локализации землетрясений с энергетическим классом $K \leq 6 \div 7$. Для детального изучения сейсмичности в данном районе необходимо развернуть более густую сеть станций, причем расстояния между станциями должны быть не менее 15 – 20 км при увеличениях не хуже 50 – 100 тысяч. Однако реализовать такие высокочувствительные наземные станции в центральной части Гиссарской долины весьма затруднительно из-за большого

уровня микросейсмических помех. Эта проблема решается введением высокочувствительной скважинной аппаратуры.

Рассмотрим систему из i уравнений, связывающую координаты гипоцентра землетрясения и координаты регистрирующих сейсмических станций. Для простоты расчетов предположим, что поверхность земли плоская, а сейсмоприемники установлены на дневной поверхности [5]. Тогда имеем:

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2 = v_i^2(\tau_i - \tau_0)^2, \quad (1)$$

где X, Y, H – координаты гипоцентра; τ_0 – время в очаге землетрясения; x_i, y_i, τ_i – координаты сейсмических станций и времена прихода сейсмических волн на эти станции; v_i – эффективные скорости распространения сейсмических волн, численно равные отношению расстояния от i -й станции до гипоцентра к времени пробега сейсмической волны.

Отметим, что если землетрясение уверенно регистрируется не менее чем тремя станциями (т. е. $i \geq 3$), то оно может быть отнесено к разряду *представительных*.

Правую часть уравнения (1) можно представить в виде

$$v_i^2(\tau_i - \tau_0)^2 = r_i^2 = d_i^2 + h^2. \quad (2)$$

Параметры: r_i – гипоцентрально расстояние до i -й станции; d_i – эпицентрально расстояние до i -й станции; h – глубина очага землетрясения определяются из схемы на рисунке 2, а, б.

В случае когда скорость v распространения сейсмических волн является функцией глубины, т. е. $v = v(z)$, величины d_i определяются из следующих соотношений:

$$d_i = \frac{p_i \int_0^h dz}{\sqrt{v^{-2}(z) - p_i^2}} + \frac{kp_i \int_h^z dz}{\sqrt{v^{-2}(z) - p_i^2}}, \quad (3)$$

где $p_i = v^{-1}(k) \sin \phi_i$ – некий лучевой параметр, причем $k = (0, 2)$.

Таким образом, если известны углы ϕ_i выхода сейсмических лучей на дневную поверхность под станциями, то глубина очага h определяется из соотношений:

$$\tau_i - \tau_0 = t_i = \frac{\int_0^h dz}{[v^2(z)\sqrt{v^{-2}(z) - p_i^2}]} + \frac{k \int_0^h dz}{[v^2(z)\sqrt{v^{-2}(z) - p_i^2}]} \quad (4)$$

Из (2), (3) и (4) следует, что величины d_i, r_i и t_i определяются однозначно решением уравнений (1) или решением более простой системы уравнений

$$(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 = d_i^2.$$

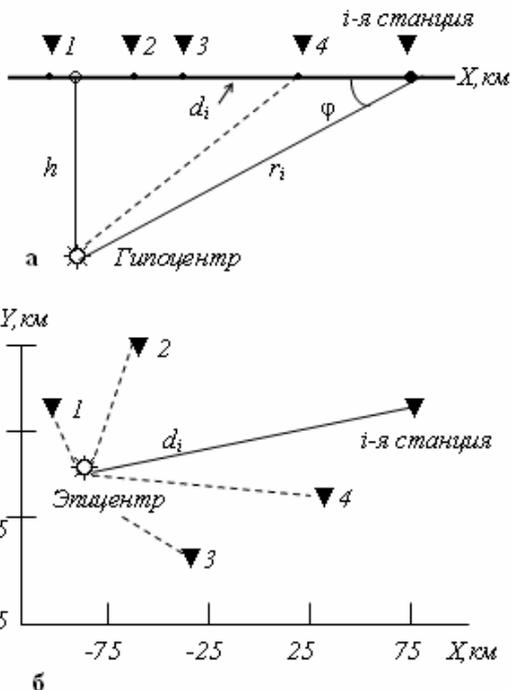


Рисунок 2 – Расположение сейсмических станций относительно очага землетрясения: а – разрез по глубине; б – по поверхности (конфигурация и масштаб условны)

3. Оценка уровня сейсмических шумов и оптимальное выделение слабых сейсмических сигналов. Проблема обнаружения слабых сейсмических событий (взрывов, землетрясений) сводится к последовательному решению трех задач [6,7]. Первая – это обнаружение на фоне сейсмических помех сигнала-события. Вторая – выделение и анализ различных типов сейсмических волн, составляющих выделенный сигнал (P, S – волны, поверхностные и обменные волны). Сюда относятся отметка времен вступления этих волн, спектральный анализ и т. д. И третья – это идентификация сейсмического события и его энергетическая оценка.

Эффективность решения сформулированных выше задач можно повысить использованием методов статистической обработки временных рядов [3,4,6]. К ним относятся:

- 1) адаптивная оптимальная пространственная фильтрация сигналов сейсмических групп;
- 2) эффективные алгоритмы обнаружения сигналов с неизвестным спектром и последующий их спектральный анализ;

3) обработка трехкомпонентных сейсмограмм методами анализа многомерных временных рядов.

Следует отметить, что направленный групповой прием и методы, упомянутые в п.3, являются достаточно эффективными (и даже статистически оптимальными), если сейсмические сигналы, принимаемые различными станциями, близки по форме и отличаются только временными задержками из-за различия путей распространения, а шумы некоррелированы во времени и в пространстве. С увеличением расстояния между станциями сигналы становятся резко различными по форме из-за частотных искажений, вносимых средой на путях их распространения,

что уменьшает выигрыш в отношении сигнал-шум. Поэтому указанный метод применяется в настоящее время только на специализированных локальных группах сейсмических станций.

3.1. Возможности методов оптимальной групповой фильтрации [3]. Блок-схема алгоритма обработки данных сейсмической группы приведена на рисунке 3 [7]. В простейшем случае, когда среда не вносит частотных искажений, согласованные групповые фильтры представляют собой комплекс простейших фильтров временных задержек τ_i , определяемых длинами сейсмических лучей d_i к сейсмоприемникам (см. рисунок 2).

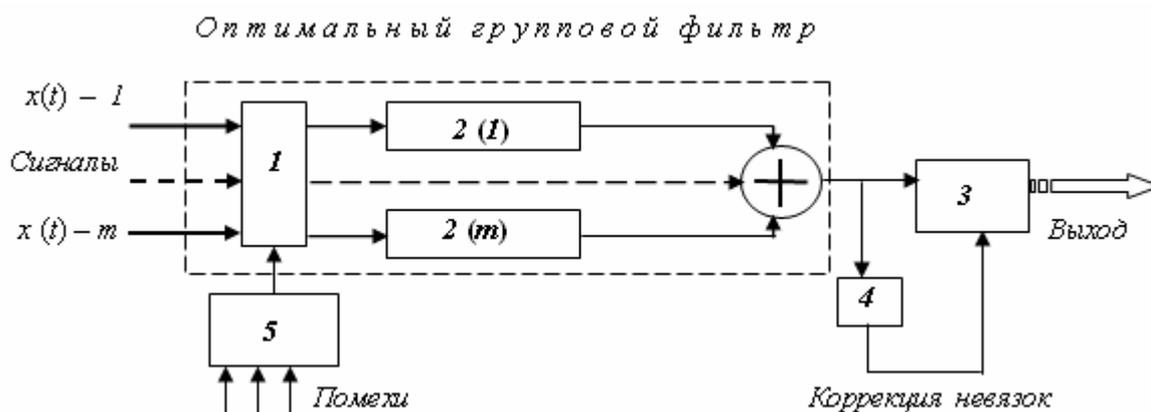


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма обработки данных сейсмической группы:
 1– матричный фильтр помех; 2(1) – 2(m) – фильтры коррекции за прохождение сейсмических лучей в среде; 3 – фильтр восстановления сигнала в источнике; 4 – алгоритм обнаружения невязок; 5 – адаптация к помехам

Реализация таких фильтров в общей постановке задачи состоит в изменении частотного состава колебаний путем умножения исходного спектра $S(\omega)$ на изменяющий его коэффициент фильтрации $K(\omega)$. Это означает, что если

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

есть исходное колебание, то после фильтрации получаем

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) K(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Если производная по времени от $f(t)$ ограничена и абсолютно интегрируема, то выражение

$$\frac{df(t)}{dt} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) i\omega e^{i\omega t} d\omega \quad (6)$$

можно рассматривать как процесс высокочастотной фильтрации. В данном случае $K(\omega) = i\omega$ и происходит увеличение амплитуд с увеличением частоты.

Процедура низкочастотной фильтрации может быть реализована с применением Фурье анализа и представлена выражением:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = -\frac{1}{\omega} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{k} \sin\left(\frac{\pi}{2} - k\omega t\right). \quad (7)$$

Из (7) следует, что в $F(t)$ амплитуды гармонических компонент уменьшаются в k раз и чем выше частота $k\omega$, тем меньше будет амплитуда, т. е. мы имеем факт низкочастотной фильтрации (короткопериодные колебания ослабляются).

Групповой фильтр (рисунок 3) весьма полезен для адаптации к “текущему” спектру помех, что важно для уверенного выделения полезного сейсмического сигнала и локализации очагов землетрясений. Однако при достаточно больших расстояниях между сейсмическими станциями геологическое строение верхней части коры в местах установки сейсмоприемников существенно различается и именно эта часть среды распространения сейсмического сигнала вносит наибольшие частотные искажения. Следовательно-

но, групповые фильтры должны иметь более сложную структуру.

3.2. Оценка и нормирование энергетических спектров сейсмических шумов и микросейсм. Как отмечено выше, микросейсмы возбуждаются разнообразными естественными и промышленными источниками. Преобладающее значение энергии микросейсм сосредоточено в низкочастотной части спектра (до 3 – 5 Гц). По мере увеличения частот энергия снижается и уже на частотах 10 – 20 Гц она примерно на два порядка ниже. По обобщенным данным [8] энергия микросейсм от действия ветра и прибойных волн на частотах от 20 до 100 Гц снижается еще на порядок. Сведения о более высокочастотных микросейсмах практически отсутствуют.

Многочисленные исследования показали, что микросейсмы регистрируются повсеместно, а их относительная интенсивность может изменяться более чем на три порядка в зависимости от местности (крупные промышленные центры или необжитые районы). Однако в конкретных точках наблюдения спектральная картина сохраняет относительную устойчивость на протяжении достаточно длительного промежутка времени. Общая зависимость амплитуды микросейсм от частоты может быть представлена хорошо подтверждаемой экспериментально зависимостью [8]

$$S_m(F) \approx F^{-m}, \quad (8)$$

где $2,0 < m < 2,7$ при $F > 5,0$ Гц.

Эта модель была построена из предположения о равномерном распределении микросейсмического шума в объеме вокруг точки наблюдения при постоянной добротности среды Q . Однако в действительности такая модель является слишком упрощенной и при наблюдениях на земной поверхности необходимо учитывать влияние верхней части осадочных отложений.

В любом случае оценка уровня микросейсмического шума является одной из важнейших задач обнаружения слабых сейсмических событий (взрывов или землетрясений). С метрологической точки зрения нормирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) конкретных районов, где проводятся наблюдения позволяет (с определенной степенью приближения) учесть как *аддитивную*, так и *мультипликативную* составляющие общего фона микросейсмического шума и помех.

На рисунке 4 представлены нормированные к максимуму АЧХ осадочного слоя в районе дислокации сейсмоизмерительных установок (в том числе скважинных) на ДГП. В качестве критерия нормирования выступает отношение A^2/A_{max}^2 , где A – среднесуточные значения ам-

плитуд микросейсм; A_{max} – максимальные зарегистрированные амплитуды.

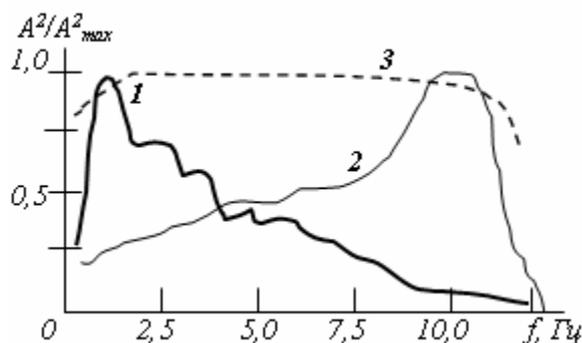


Рисунок 4 – Нормированные энергетические спектры микросейсм: 1 – спектры среднесуточных микросейсм на территории ДГП; 2 – спектры техногенных шумов на поверхности; 3 – АЧХ сейсмометрического канала

3.3. Оптимизация отношения сигнал – сейсмический шум. Для задачи уверенного выделения сигналов на фоне сейсмических шумов одним из важнейших является критерий отношения сигнал-помеха на входе сейсмоприемника.

В общем виде среда распространения сейсмического сигнала от очага землетрясения до i -го сейсмоприемника может быть представлена как линейная измерительная система с передаточной функцией $K(\omega)$, на вход которой подается аддитивная смесь сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$ (рисунок 5).

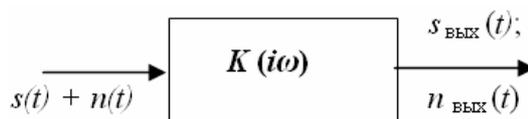


Рисунок 5 – Воздействие сигнала от очага и сейсмической помехи на измерительную систему

Представим выходной сигнал в виде

$$s_{\text{вых}}^2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S^2(\omega) d\omega \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K^2(i\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (9)$$

где $K(i\omega) = K_0 e^{i\varphi K(\omega)}$ – передаточная функция сейсмоизмерительной системы с заданными фазочастотной и амплитудно-частотной характеристиками (подобные зависимости, изображены на рисунке 4), при $K_0 = \text{const}$.

Что бы вычислить оптимальную передаточную функцию, максимизирующую отношение сигнал-помеха, воспользуемся записью выражения, которое характеризуется определенными условиями [8]:

$$s_{\text{вых}}(t) / \sigma \leq \sqrt{\mathcal{E} / W_0}, \quad (10)$$

где среднеквадратическое значение сейсмических шумов

$$\sigma = \sqrt{\frac{W_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K^2(\omega) d\omega}; \quad (11)$$

W_0 – полная энергия шумов; \mathcal{E} – полная энергия сигнала, определяемая из (10).

Неравенство (10) обращается в равенство при выполнении условия

$$\mathbf{K}(i\omega) e^{i\omega t} = AS^*(\omega),$$

откуда

$$\mathbf{K}(i\omega) = K(\omega) e^{i\varphi_K(\omega)} = AS(\omega) e^{-i[\varphi_S(\omega) + \omega t_0]}. \quad (12)$$

Полученное соотношение полностью определяет передаточную функцию, максимизирующую отношение сигнал-помеха на выходе системы [8], поскольку из этого соотношения вытекают условия для фазовой и амплитудных характеристик согласованного фильтра:

$$\begin{cases} \varphi_K(\omega) = -[\varphi_S(\omega) + \omega t_0]; & (13) \\ K(\omega) = AS(\omega). & (14) \end{cases}$$

Эти соотношения имеют глубокий физический смысл.

Выражения (12) и (13) определяют компенсацию начальных фаз в спектре сигнала, а в (14) устанавливается, что модуль передаточной функции $K(\omega)$ должен по своей форме совпадать с модулем спектральной плотности $S(\omega)$, а коэффициент A должен иметь размерность, обратную размерности спектральной плотности сигнала, в то же время он совпадает с нормированными энергетическими спектрами микросейсм и шумов, показанных на рисунке 4. При АЧХ $K(\omega)$, отвечающей условию (14), фильтр (измерительная система) пропускает спектральные составляющие шума с тем большим ослаблением, чем меньше модуль $S(\omega)$, что приводит к существенному уменьшению мощности шума на выходе.

4. Скважинные наблюдения. Организация высокочувствительных режимных сейсмических наблюдений предполагает уверенную регистрацию микроземлетрясений, имеющих амплитуду колебаний 10^{-7} м и менее. В то же время уровень сейсмического шума превышает значения $10^{-7} \div 10^{-6}$ м даже в местах, относительно удаленных от населенных пунктов. В работах [1,2] указывается, что сейсмический шум, образованный в основном поверхностными волнами Релея и Лява [1], убывает с глубиной. Однако и полезный сигнал на глубине слабее, так как на дневной поверхности амплитуда волн удваивается за счет отражения на границе земля-воздух. Реальный выигрыш чувствительности аппаратуры при погружении сейсмоприемника определяется отношением, насколько уровень помех с глубиной убывает быстрее, чем полезный сигнал. Так,

экспериментальные наблюдения в скважине Шаамбары показали, что при глубине погружения до 600 м сейсмический шум с дневной поверхности практически не ощущается.

Это дает возможность существенно повысить чувствительность аппаратуры (вплоть до увеличений 600 000 – 700 000).

Следует отметить, что бурение и эксплуатация глубоких скважин требуют значительных материальных и трудовых затрат. Поэтому были проведены исследования, направленные на поиск оптимальных соотношений между глубиной скважины и необходимым увеличением сейсмометрического канала. На рисунке 6 представлен график, поясняющий характер затухания сейсмических шумов с глубиной для скважин Кара-Су и Шаамбары.

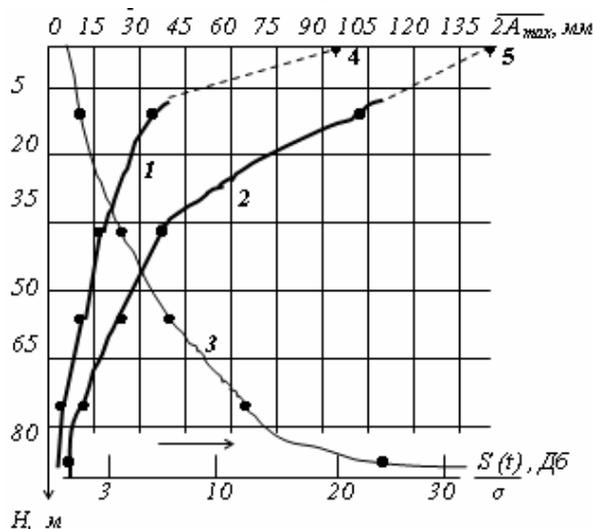


Рисунок 6 – Зависимость уровня сейсмических шумов от заглубления сейсмометра:
 1 – для скважины Кара-Су; 2 – для скважины Шаамбары; 3 – зависимость отношения сигнал-шум от глубины (осредненная кривая);
 4 – сейсмометр СМ-3 (Кара-Су);
 5 – сейсмометр СМ-3 (Шаамбары)

Измерения производились в дневное (самое активное по сейсмическим шумам) время с 9 до 15 часов. В ходе измерений снаряд с сейсмометром большого увеличения (СБУ) фиксировался в обсадной трубе скважины на глубинах 8 м, 35 м, 55 м и 75 м последовательно.

В качестве регистрируемого параметра принималась средняя величина удвоенных максимальных амплитуд на сейсмограмме. Временные выборки равнялись 10 минутам в каждой фиксированной точке по глубине. Увеличение сейсмометрического канала при этом устанавливалось постоянным. Из рисунка 6 следует, что уже на глубине 75 – 80 м уровень шумов уменьшается в несколько раз (для более “шумной” площадки Шаамбары почти в 10 раз), что позволяет реали-

зовывать сейсмометрические каналы с увеличением более 200 000 (рисунок 7). Для сравнения на “дневной” поверхности был установлен типовой сейсмоизмерительный канал (сейсμοприемник СМ-3, увеличение $V = 20\ 000$). Еще более наглядны сейсмограммы на рисунке 8, где представлены записи шумов от проезжающего автотранспорта на поверхности и в скважине.

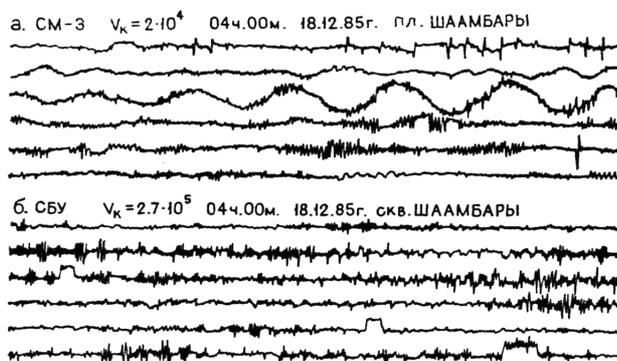


Рисунок 7 – Запись микросейсм и шумов на поверхности и в скважине: а – на сейсмограмме, зарегистрированной в утренние часы, выделяются длиннопериодные (т. н. приливные) микросейсм, обусловленные прохождением поверхностных волн. Спектральная характеристика таких микросейсм соответствует кривой 1 на рисунке 4; б – на глубине 75 м микросейсм практически не регистрируются (увеличение $V = 270\ 000$)

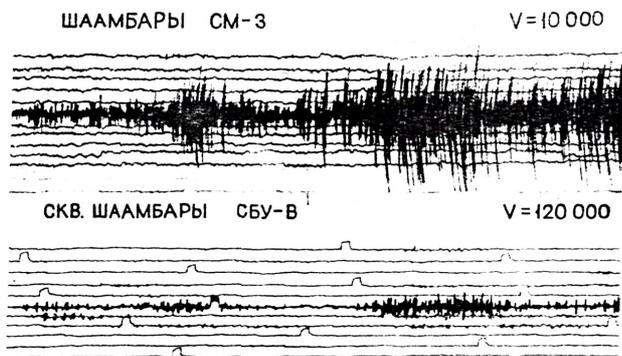


Рисунок 8 – Запись помех от автотранспорта: на поверхности (верхняя сейсмограмма); в скважине 75 м (нижняя сейсмограмма). Реальный выигрыш в отношении сигнал/шум (при увеличении $V = 120\ 000$) составил $\geq 20\ \text{Дб}$

Реальная запись слабого местного землетрясения, произведенная скважинной сейсмометрической установкой (станция Кара-Су) и глубокой погружения сейсмометра СБУ на 87 м, приведена на рисунке 9. Эффективный выигрыш чувствительности по сравнению с наземными установками (станции Кара-Су и Чуянгарон) превышает 8 раз.

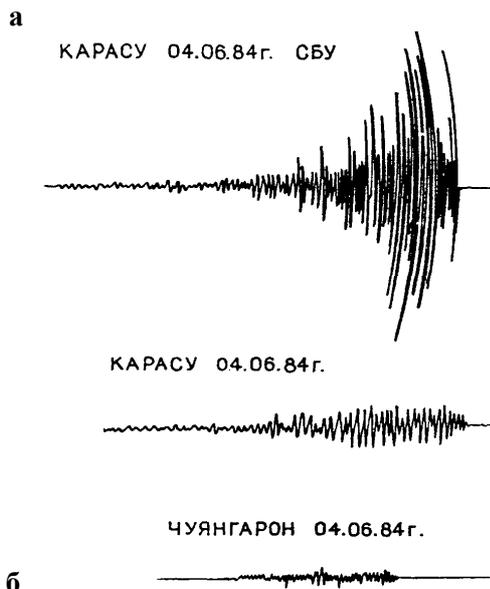


Рисунок 9 – Записи близкого землетрясения, произведенного: а – скважинным сейсмометром СБУ-В ($V = 120\ 000$) и одновременно типовой наземной станцией ($V = 20\ 000$); б – запись того же землетрясения более удаленной станцией ($V = 20\ 000$)

Пример записи удаленного землетрясения, зарегистрированного сейсмометрами станции Шаамбары (СБУ-В и наземным), показан на рисунке 10.

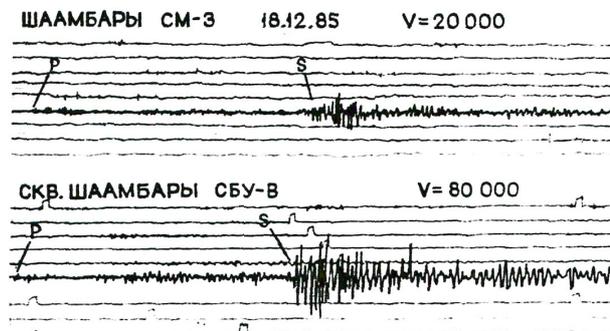


Рисунок 10 – Записи удаленного землетрясения

Преимущества скважинных сейсмометров большого увеличения при регистрации таких землетрясений не столь очевидны (о причинах этого явления упоминалось). Это говорит о целесообразности применения скважинной сейсмометрии преимущественно для регистрации местных слабых землетрясений и взрывов.

5. Аппаратура и оборудование для скважинной сейсмометрии. Одним из отечественных скважинных сейсμοприемников является сейсмометр большого увеличения (СБУ- В) конструкции Г.Л. Шнирмана [9]. Он предназначен для гальванометрической регистрации вертикальных составляющих сейсмических волн в специально оборудованных обсаженных скважинах диамет-

ром в пять дюймов на глубине до тысячи пяти-сот метров. В комплект установки входят: скважинный снаряд, в котором помещается собственно сейсмоприемник, а также автоматика и наземный пульт управления. Длина скважинного снаряда 1,78 м, диаметр 105 мм, вес 43 кг. СБУ-В снабжен автоматическими системами арретирования и вывешивания маятника. Команды на арретирование/дезарретирование и вывешивание подаются с наземного пульта.

Для применения СБУ-В совместно с телеметрическими каналами в его конструкцию при организации наблюдений были внесены некоторые изменения (рисунок 11). Суть этих усовер-

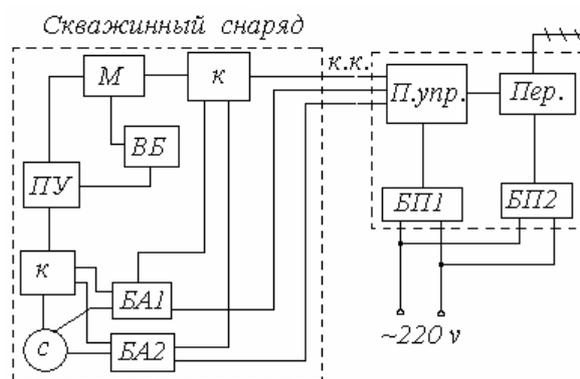


Рисунок 11 – Схема скважинной сейсмотелеметрической установки с сейсмометром СБУ-В: с – сейсмодатчик; ПУ – предварительный усилитель; М – модулятор; БА1, БА2 – блоки автоматики; к – коммутатор; ВБ – внутренняя батарея; П.упр. – наземный пульт управления; Пер. – радиопередатчик; БП1, БП2 – блоки питания; к.к. – каротажный кабель

Для развития массовых скважинных сейсмотелеметрических наблюдений нужны малогабаритные датчики со стабильными характеристиками, способные измерять как слабые, так и разрушительные землетрясения. Весьма перспективными в этом отношении могут оказаться сейсмотелеметрические системы на основе электрохимических преобразователей [10].

Сейсмоприемник электрохимический (СПЭХ) является прибором инерционного действия параметрического типа с жидкостной инерционной массой и сравнительно большим коэффициентом демпфирования. В связи с этим при малых габаритах и весе можно получить довольно низкую частоту собственных колебаний системы и устранить резонансные явления.

СПЭХ представляет собой полый цилиндрический корпус, на торцевых сторонах которого закреплены эластичные мембраны. Средняя часть корпуса имеет перегородку с отверстием, в котором расположены сетчатые электроды. Внутренняя полость датчика заполняется электролитом, представляющим собой раствор йодистого калия с небольшой добавкой йода. СПЭХ включается в электрическую цепь постоянного

тока, причем между анодом и катодом поддерживается напряжение порядка $0,4 \pm 0,6$ В. При возникновении механических воздействий происходят колебания корпуса СПЭХ с электродами относительно электролита. Вследствие электрохимической реакции эти колебания преобразуются в переменный электрический сигнал, частота которого соответствует частоте внешнего механического воздействия, причем коэффициент пропорциональности является частотно-зависимым.

В конструкции пульта управления была изменена система подачи команд в блок автоматики снаряда и систему контроля положения маятника. Питание блоков наземной аппаратуры осуществляется от сети 220 вольт.

Варьируя электрические, механические, гидравлические и химические параметры и используя внешние корректирующие цепи, можно управлять АЧХ датчика.

СПЭХ без всяких переналадок может быть использован для регистрации колебаний в любой пространственной ориентации.

На рисунке 12 показана конструктивная схема 3-компонентной скважинной установки, разработанной и испытанной совместно с Институтом электрохимии АН РФ.

В корпусе от стандартного снаряда СБУ-В размещены: 3 сейсмоприемника СПЭХ (один вертикальный и два горизонтальных), электронные

электронные

усилители и схемы сопряжения (2 – 4), схемы температурных корректоров (5), генераторы поднесущих частот и модуляторы (6, М1 – М3). Конструкцией предусмотрена возможность подачи питания и снятия группового сигнала по 3-жильному каротажному кабелю. Установка рас-

считана для работы со стандартной телеметрической аппаратурой на поднесущих частотах 1020 Гц, 2380 Гц, 2700 Гц, с девиацией ± 125 Гц. Разработки такой аппаратуры, выполненной по технологии гибридных интегральных микросхем, предложены в работе [11].

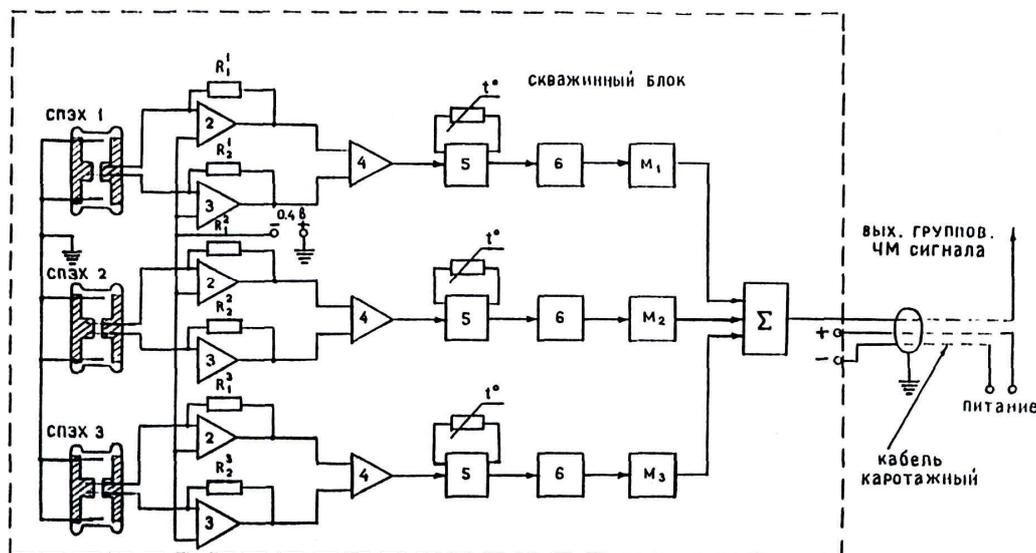


Рисунок 12 – Конструктивная схема 3-компонентной скважинной сейсмотелеметрической установки с электрохимическими датчиками

6. Выводы. Рассмотрены вопросы измерения слабых сейсмических сигналов в условиях повышенных техногенных шумов и микросейсм.

В связи с этим предложена оценка эффективности сети сейсмических станций при регистрации минимальных представительных для данной группы событий. Предложен несложный алгоритм вычисления координат гипоцентров сейсмических событий.

Сформулирована задача оценки уровня сейсмических шумов и оптимального выделения слабых сейсмических сигналов, в том числе методами оптимальной групповой фильтрации.

Обосновываются методы оценки и нормирования энергетических спектров сейсмических шумов и микросейсм.

Показано, что для уверенного выделения сигналов на фоне сейсмических шумов одним из важнейших критериев является отношение сигнал-помеха на входе сейсмоприемника.

Экспериментальные измерения сейсмических шумов и микросейсм проводились на территории ДПП, в том числе с применением скважинных сейсмометров. Найденные зависимости убывания сейсмического шума с заглублением сейсмоприемников дают основание для организации оптимальных по затратам и эффективности скважинных наблюдений.

В связи с этим предложены разработки аппаратуры и методики для организации массовых

сейсмометрических наблюдений в целях сейсмического мониторинга крупных промышленных центров и территорий.

Библиографический список

1. Монахов Ф.И. Низкочастотный шум Земли. – М.: Наука, 1977. – 95 с.
2. Аксенович Г.И. и др. Изучение закономерностей убывания фона сейсмических помех с глубиной в городах Алма-Ата и Ташкент // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1972, № 11.
3. Capon J., Greenfield R.J., Kolker R.J. Multi-dimensional Maximum-Likelihood Processing of a Large Aperture Seismic Array // Proceedings of the IEEE, 55, 192 – 211, 1967.
4. Bungum H., Husebye E., Ringdahl F. The NORSAR array and preliminary results of data analysis // Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 1971, vol. 25, p. 115 – 126.
5. Бурмин В.Ю. Оптимальное расположение сейсмических станций при регистрации близких землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 5. С. 34 – 42.
6. Кушнин А.Ф., Лапшин В.М. Оптимальная обработка сигналов, принимаемых группой пространственно-распределенных датчиков // Вычисл. сейсмология, Вып. 17. Наука, 1984. – С. 159 – 169.
7. Кушнин А.Ф., Лапшин В.М. и др. Статистически оптимальное выделение сейсмических сигналов с помощью группы станций // Вычисл. сейсмология; Вып. 22. Наука, 1989. – С. 193 – 210.
8. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов. изд. 3-е, перераб. и доп. –

М.: Сов. радио, 1977. - 608 с.

9. Скважинный сейсмометр СБУ-В // В кн. "Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР". - М.: Наука, 1974. - С. 61 - 63.

10. *Абрамов О.К., Мельников А.Ю., Семенчиков В.Д.* Перспективные датчики для инженерной

сейсмометрии на энергообъектах. НИИЦентр, 1994. - 22 с.

11. *Ульянов В.И., Абрамов О.К., Мельников А.Ю.* Схемотехника гибридных микроэлектронных устройств для сейсмической телеметрии. // Сб. научных трудов "Автоматизация измерений и испытаний". - Рязань: РГРТА, 1999. - С. 81 - 87.