



А. Е. Сунцов
А. Г. Мехнин
И. Генделман
Ю. В. Сиротинский

НТК АНЧАР, МОСКВА
НТК АНЧАР, МОСКВА
DIRECT PETROLEUM EXPLORATION, ДЕНВЕР, США
ИФХЭ им. А. Н. ФРУМКИНА РАН, МОСКВА

ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ В УСЛОВИЯХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

АННОТАЦИЯ. Предложен вариант оценки спектральной мощности собственных шумов измерительного тракта сейсмологической аппаратуры непосредственно в полевой обстановке на земной поверхности. Показана его эффективность путём сравнения результатов оценки шумов, выполненной в условиях измерений в штольне и на земной поверхности.

ВВЕДЕНИЕ. В практике использования технологии микросейсморазведки нефти и газа АНЧАР (в США - ADD_HR) большое значение имеет применение высокочувствительной в инфразвуковом диапазоне частот (0 - 10 Гц) измерительной аппаратуры. Это прежде всего вызвано необходимостью измерения слабых (менее 100 нм) сигналов, характеризующих микросейсмические колебания. Уже по указанному частотному диапазону и по уровню измеряемых сигналов очевидно, что аппаратура должна быть близкой к сейсмологическому классу. Кроме того, производство полевых работ диктует необходимость мобильности, простоты и надёжности эксплуатации.

Однако существующие предложения такому комплексу условий не удовлетворяют. Хорошие характеристики по собственным шумам и чувствительности в указанном диапазоне частот традиционно достигаются за счёт больших линейных размеров модулей, большой массы и, как следствие, особых условий эксплуатации (арретирование, жёсткие требования к транспортировке и пр.).

Для решения этой проблемы компанией АНЧАР была разработана целая линейка прецизионных телеметрических многокомпонентных измерительных модулей АНЧАР-Гео.

Измерительный модуль АНЧАР-Гео-7 по своим характеристикам (низкий уровень собственных шумов, высокая чувствительность) может быть отнесён к сейсмологическому классу, однако в отличие от стандартной сейсмологической аппаратуры является существенно более мобильным и приспособленным для полевых измерений.

ABSTRACT. In the paper the method of the estimate technology of the seismology measure device spectral power of the intrinsic noise on earth surface conditions is proposed. The efficiency of the one has been showed with comparing results of the method applying to the different situations: in earth surface and adit conditions.

Действительно, АНЧАР-Гео-7 в отличие от стандартных (даже мобильных) сейсмологических датчиков не требует юстировки, арретирования, время подготовки к измерениям составляет 5 мин, а не 20 мин как обычно. АНЧАР-Гео-7 уникален по ударостойкости: он выдерживает падение на бетонную полосу с 2 м. Обычная сейсмологическая аппаратура способна выдержать только транспортную тряску. Следует ещё добавить, что большинство используемых в микросейсморазведке модулей по массе превышают АНЧАР-Гео-7 в 4 - 5 раз (масса АНЧАР-Гео-7 6 кг).

Телеметрические измерительные трёхкомпонентные инфразвуковые модули регулярно проходят государственную метрологическую аттестацию в ФГУП ВНИИ-ФТРИ. Подобный контроль традиционно предусматривает проведение межаттестационных контрольных измерений по специальной методике (Сиротинский Ю. В., Графов Б. М., Сунцов А. Е., 2004), в т. ч. в условиях как можно более низкого входного сигнала, т. е. в условиях минимального уровня микросейсмических колебаний. Низкий уровень микросейсмических колебаний, практически на грани чувствительности, позволяет прямо оценить такую важную характеристику измерительной аппаратуры, как уровень собственных шумов измерительного тракта. Подобные условия существуют на сейсмологических станциях в штольнях, вырубленных в скальных породах, в шахтах и пр. Такие измерения достаточно трудоёмки и дороги. Но только они допускают прямую оценку уровня собственных шумов всего измерительного тракта в целом. Авторами был предложен способ оценки собственных шумов аппаратуры с исполь-

зованием идеи вычитания когерентной части записываемого сигнала.

ОЦЕНКА СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА. ТЕОРИЯ

Рассмотрим измерения микросейсмического фона модулями a и b , расположенными так, что оси чувствительности сенсоров параллельны, а сами измерительные системы установлены на жёстком основании вплотную друг к другу. Тогда на вход обоих модулей будет подаваться один и тот же сигнал s_i , и справедливы следующие соотношения¹:

$$\begin{aligned} u_i^a &= s_i + n_i^a, \\ u_i^b &= s_i + n_i^b, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_i^a, u_i^b - сейсмограммы входного сигнала на модулях a и b ; n_i^a, n_i^b - собственный шум измерительного тракта, соответственно, модулей a и b . Не уменьшая общности рассмотрения, под индексом i можно понимать номер гармоники Фурье-разложения сейсмограмм. Тогда, используя (1), для спектра кросс-корреляционной функции $\langle u_i^a u_i^{*b} \rangle$ и спектральных мощностей сейсмограмм $\langle u_i^a u_i^{*a} \rangle, \langle u_i^b u_i^{*b} \rangle$ можно записать следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \langle u_i^a u_i^{*b} \rangle &= S_i, \\ \langle u_i^a u_i^{*a} \rangle &= S_i + N_i^a, \\ \langle u_i^b u_i^{*b} \rangle &= S_i + N_i^b, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\langle \dots \rangle$ - обозначает усреднение по реализациям или по времени; S_i - спектральная мощность входного сигнала; N_i^a, N_i^b - искомые спектральные мощности (СПМ) собственного шума измерительного тракта модуля, соответственно, a, b .

Уравнения (2) получены при естественном предположении отсутствия корреляции собственных шумов двух независимых измерительных трактов:

$$\langle n_i^a n_i^{*b} \rangle = 0. \quad (3)$$

Отметим, что последние два уравнения в (2) при достаточно малом входном сигнале S_i приводят к следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} N_i^a &\approx \langle u_i^a u_i^{*a} \rangle, \\ N_i^b &\approx \langle u_i^b u_i^{*b} \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

¹ Учёт передаточных функций не меняет принципиально данное рассмотрение.

т. е. спектральная мощность собственного шума измерительного канала порядка спектральной мощности записанной сейсмограммы.

Используя (2), легко получить искомые выражения для определения СПМ собственных шумов двух независимых измерительных трактов:

$$\begin{aligned} N_i^a &= \langle u_i^a u_i^{*a} \rangle - \langle u_i^a u_i^{*b} \rangle, \\ N_i^b &= \langle u_i^b u_i^{*b} \rangle - \langle u_i^a u_i^{*b} \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

В правой части (5) стоят измеримые величины. Выражения (5) хорошо иллюстрируют физический смысл используемого подхода: из записанной на каждом канале сейсмограммы $\langle u_i^a u_i^{*a} \rangle$ удаляется когерентная часть $\langle u_i^a u_i^{*b} \rangle$, которая, в силу построения эксперимента, соответствует одному и тому же входному сигналу, при этом остаток и есть собственный шум канала N_i^a .

Таким образом, формулы (4) соответствуют способу оценки N_i^a и N_i^b в условиях штольни при слабом входном сигнале. Использование (5) позволяет сделать оценку N_i^a и N_i^b даже на земной поверхности при большом входном сигнале.

ОЦЕНКА СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА. ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 1 приведены, соответственно, сейсмограммы и спектральные мощности (СПМ) микросейсмического фона. Измерения выполнялись двумя модулями АН-ЧАР-Geo, установленными так, что оси чувствительности сенсоров параллельны, а сами измерительные системы стояли на жёстком основании вплотную друг к другу. Тогда на вход вертикальных компонент обоих модулей подаётся одинаковый сигнал. Эксперимент проводился в условиях штольни, вырубленной в скальной породе, на сейсмологической станции в Альбукеркере (США).

Уровень микросейсмического фона на этой станции - один из самых низких на Земле, и для подобных исследований она подходит как нельзя лучше. Приведённые на рис.1 кривые СПМ собственного шума рассчитаны по (5). Видно хорошее согласие с (4): СПМ собственного шума N_i^a того же порядка, что и СПМ входного сигнала $\langle u_i^a u_i^{*a} \rangle$.

Подобные измерения (рис. 2) с использованием той же самой пары измерительных модулей были проведены на земной поверхности в штате Колорадо (США). Измерения выполнялись в ночное время. Хорошо видно и по сейсмограмме, и по кривой СПМ входного сигнала, что уровень микросейсм по вертикальным компонентам модулей на земной поверхности существенно превосходит уровень микросейсм в штольне. При этом, однако, кривая СПМ собственного шума, рассчитанная по (5), хотя и в условиях высокого уровня вход-

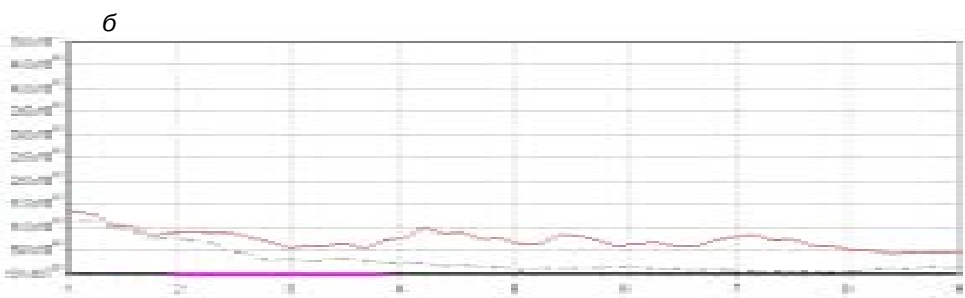
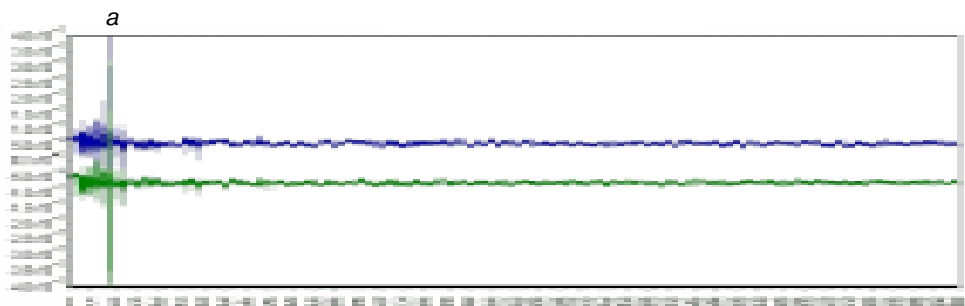


Рис. 1. США, Альбукеркер: а - сейсмограммы микросейсмического фона в штольне; б - СПМ микросейсмического фона в штольне - красная кривая и собственного шума измерительного тракта, рассчитанного по (5) - зелёная кривая

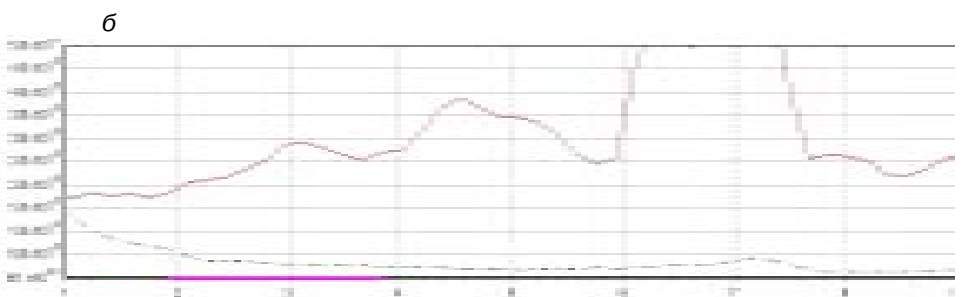
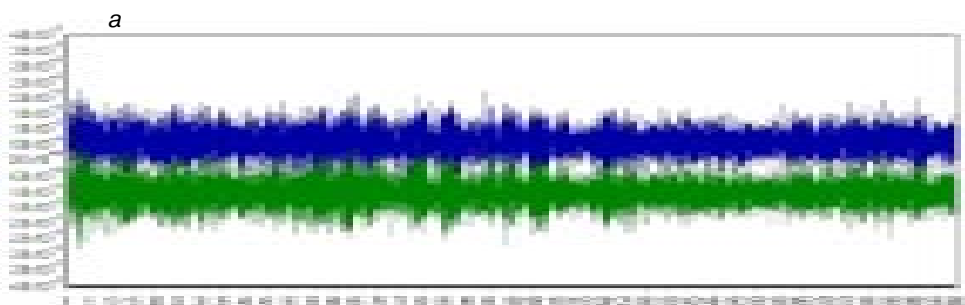


Рис. 2. США, Шайнвелл: а - сейсмограммы микросейсмического фона на земной поверхности; б - СПМ микросейсмического фона на земной поверхности - красная кривая и собственного шума измерительного тракта, рассчитанного по (5) - зелёная кривая

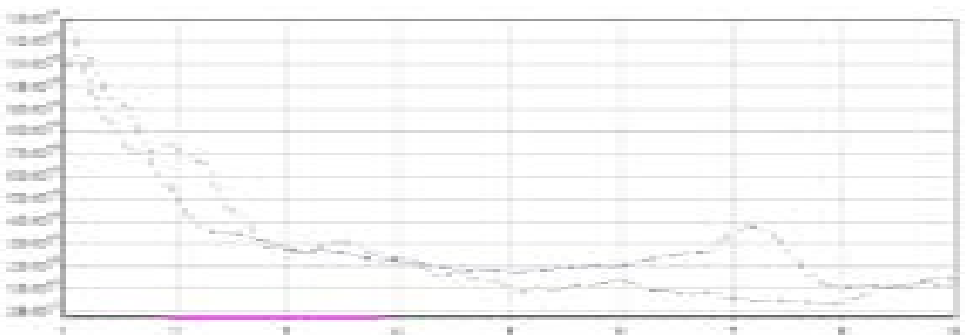


Рис. 3. Сравнительная характеристика СПМ собственных шумов измерительных трактов, рассчитанных по (5), с использованием сейсмограмм, записанных на земной поверхности (зелёная кривая) и в штольне (синяя кривая)

ного сигнала, почти не отличается от соответствующей кривой в Альбукеркере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Сравнение кривых спектральной мощности собственного шума (рис. 3), рассчитанных по (5), в условиях низкого уровня (исследования в штольне) и

высокого (земная поверхность) входного сигнала говорит о их хорошем соответствии. Таким образом, показана возможность оценки собственного шума измерительного тракта аппаратуры в полевых условиях на земной поверхности даже в условиях высокого уровня микросейсмического фона.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Андрей Евгеньевич СУНЦОВ - старший научный сотрудник ИФХЭ им. А. Н. Фрумкина, директор по технологическому развитию и науке НТК АНЧАР, кандидат физ.-мат. наук.

Алексей Григорьевич МЕХНИН - ведущий специалист, НТК АНЧАР, Калуга.

Игорь ГЕНДЕЛМАН - руководитель отдела, Direct Petroleum Exploration, Денвер, США.

Юрий Владимирович СИРОТИНСКИЙ - заведующий лабораторией Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, заместитель генерального директора НТК АНЧАР, кандидат техн. наук.