

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОФОНОВ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

*Петр Александрович Дергач*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

*Антон Альбертович Дучков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

*Вячеслав Иванович Юшин*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, e-mail: YushinVI@ipgg.sbras.ru

В работе описан способ, позволяющий оценить возможности использования геофонов в локальных сетях сейсмологического мониторинга. Необходимое в этом случае расширение полосы частот регистрируемых сигналов достигается путем программной коррекции (низкочастотной деконволюции) исходных записей. Отличительной особенностью работы является то, что возможность и целесообразность применения деконволюции увязывается с сейсмической энергией событий, а не только с уровнем исходных сейсмических сигналов.

**Ключевые слова:** геофон, электродинамический сейсмометр, частотная коррекция записи, низкочастотная деконволюция, собственная частота, аппаратный шум.

## **GEOPHONES IN LOCAL SEISMOLOGICAL NETWORKS**

*Petr A. Dergach*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Researcher, e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

*Anton A. Duchkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

*Vyacheslav I. Yushin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor, Leading Researcher, e-mail: YushinVI@ipgg.sbras.ru

In this paper, a method of assessment of geophones capability in seismological networks is described. The expansion of records frequency band, which are needed in this case, is performed by special software (low-frequency deconvolution algorithm). The main feature of the work is that the possibility of deconvolution is linked to the seismic energy of events, and not only to the level of the original seismic signals.

**Key words:** geophone, electrodynamic seismometer, seismic record frequency correction, low-frequency deconvolution, natural frequency, instrumental noise.

## *Введение*

В последнее время повышается актуальность задач, связанных с использованием локальных сетей сейсмологического мониторинга. К таким задачам относятся мониторинг разработки месторождений с использованием стационарных сетей [1], а также детальное изучение очаговых зон крупных землетрясений [2] и вулканов с использованием временных сетей [3].

Как правило, современные сейсмологические сети оснащены дорогостоящими широкополосными сейсмометрами. Высокая стоимость таких датчиков, трудоемкость их установки, последующего обслуживания и охраны делают такие работы чрезвычайно затратными. Вместе с тем, современные геофоны, будучи дополнены соответствующей процедурой обработки записей, зачастую вполне пригодны и для оснащения таких сетей. Использование геофонов позволяет увеличить густоту локальных сейсмологических сетей благодаря снижению затрат на их обустройство и обслуживание. Целью работы является повышение эффективности технологии пассивного сейсмического мониторинга естественных и антропогенных процессов в геологической среде.

Задача настоящей работы состоит в обосновании пределов допустимости использования геофонов в системах локального сейсмологического мониторинга в предположении, что необходимое расширение полосы частот регистрируемых сигналов достигается путем частотно-зависимой коррекции (низкочастотной деконволюции) исходных записей. Отличительной особенностью работы является то, что возможность и целесообразность применения деконволюции увязывается с сейсмической энергией событий, а не только с уровнем исходных сейсмических сигналов.

## *Метод низкочастотной деконволюции*

Основным препятствием для применения геофонов для всех перечисленных задач является относительно высокая собственная частота (диапазон рабочих частот обычно начинается от 10-15 Гц), так как она накладывает существенные ограничения на регистрацию сигналов в области низких частот. Ситуация стала резко меняться в последние годы. Во-первых, наблюдается прогресс в разработке и производстве геофонов: появились модификации со значениями собственной частоты вплоть до 4,5-5 Гц и имеющие повышенную чувствительность, порядка 100 В/м/с. Во-вторых, в отличие от классической сейсмологии, в вышеперечисленных задачах достаточно обеспечить регистрацию частот выше 0,1-1 Гц. Однако эти значения все же оказываются ниже рабочей полосы стандартного сейсморазведочного геофона.

Для восполнения этого пробела могут быть использованы методы коррекции частотных характеристик геофонов [4, 5]. В частности, метод низкочастотной деконволюции [6, 7] позволяет извлекать информацию о колебаниях, частоты которых находятся ниже рабочей полосы датчика на этапе цифровой обработки записей. При этом запись геофона преобразуется в запись «виртуального» датчика, имеющего более низкое значение собственной частоты (как правило, на 1-2 порядка ниже.) Для реализации процедуры необходимо знать лишь два динамических параметра геофона: собственную частоту и безразмерный коэффициент демпфирования. Эти параметры можно взять из технического описания геофона или для большей точности получить посредством калибровки [7]. В общем случае метод низкочастотной деконволюции применим ко всем типам электродинамических сейсмометров, однако, в рамках данного исследования мы сконцентрируемся именно на геофонах.

### *Программная реализация метода*

Формально алгоритм низкочастотной деконволюции в частотной области можно записать в виде выражения:

$$\hat{V}(f) = \frac{\hat{y}(f)}{\hat{g}(f; d, f_0)} \hat{g}(f; d, f_n),$$

где  $\hat{y}(f)$  – результат преобразования Фурье исходной записи;  $\hat{g}(f; d, f_0)$  – комплексная частотная характеристика (КЧХ) исходного геофона с параметрами  $d, f_0$ ;  $\hat{g}(f; d, f_n)$  – КЧХ «виртуального» геофона с параметрами  $d, f_n$ , к которому надо привести запись.

Перед делением на  $\hat{g}(f; d, f_0)$  необходимо принудительно задать значение на нулевой частоте равным 1 (чтобы избежать деления на ноль). Эта процедура корректна в силу того, что нулевая частота по сути является смещением сигнала на постоянную составляющую и не имеет никакого отношения к работе геофона. К примеру, низкочастотный дрейф, зачастую наблюдаемый в сейсмических записях, появляется вследствие прохождения сигнала через усилитель цифрового регистратора [8]. Вследствие этого, в некоторых случаях для стабилизации решения (то есть для лучшего подавления низкочастотного шума, возрастающего в результате обратной фильтрации) может потребоваться дополнительное применение фильтра высоких частот. Важно отметить, что при делении на КЧХ, мы корректируем не только амплитудный, но и фазовый спектр исходной записи.

На рис. 1 приведен пример обработки записи землетрясения, произведенной 4,5-герцовым геофоном при помощи программы низкочастотной деконволюции [9].

Пример хорошо иллюстрирует восстановление низкочастотной составляющей из сигнала геофона, которая до этого была подавлена.

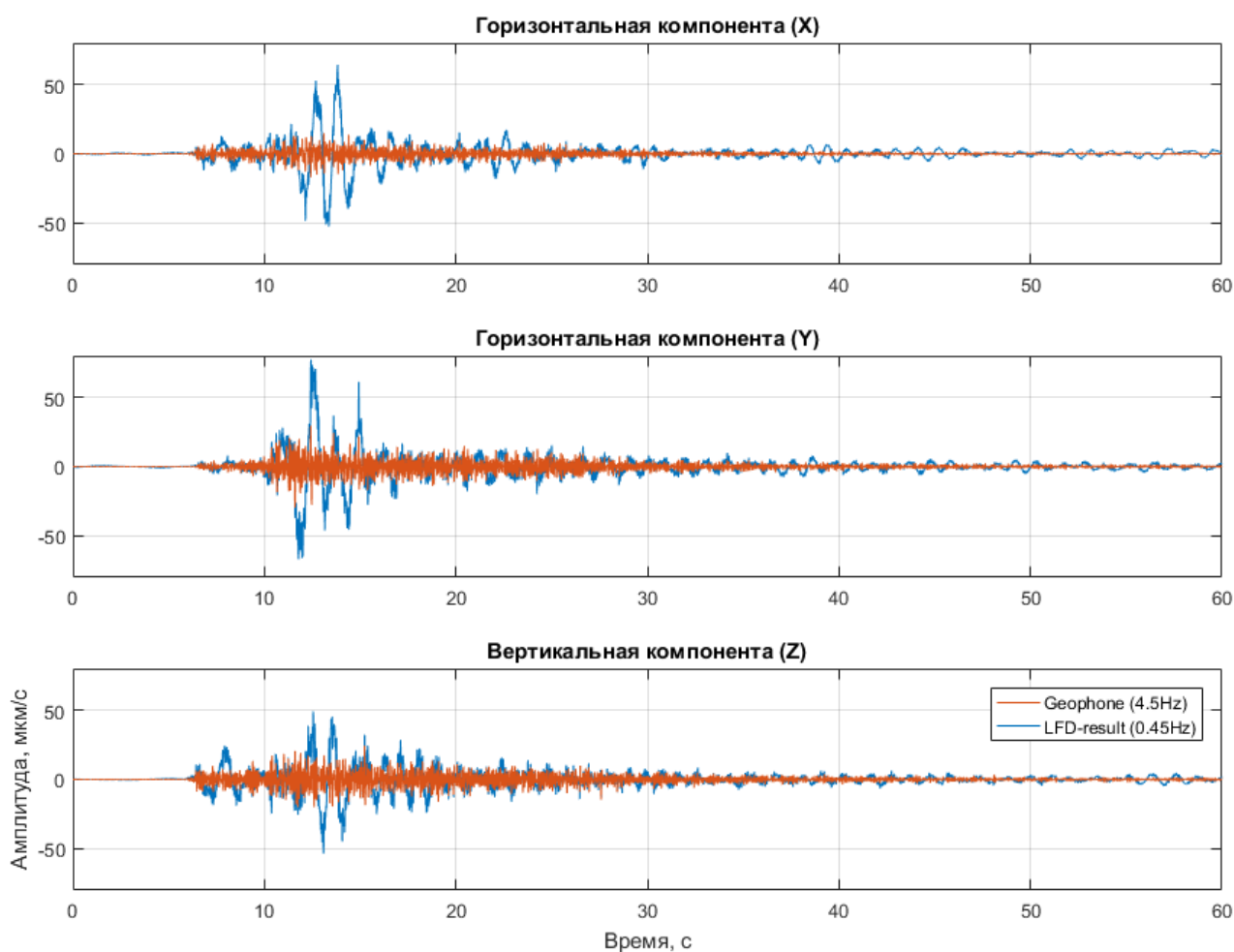


Рис. 1. Трехкомпонентная запись локального землетрясения с магнитудой 4,3, произошедшего 09.01.2019, гипоцентральное расстояние 30 км (по информации ФИЦ ЕГС РАН).

Запись произведена с использованием 4,5-герцового геофона (красная линия). Результат ее деконволюции к частоте 0,45 Гц показан синей линией

### *Ограничения метода*

Основным ограничением метода является наличие аппаратного шума (прежде всего, шума операционного усилителя сейсмического регистратора). Он не позволяет восстанавливать сколь угодно низкие частоты колебаний, так как чувствительности датчика в этой полосе частот недостаточно, чтобы его реакция превысила возросший аппаратный шум. Таким образом, возникает проблема разделения восстановленного полезного низкочастотного сигнала и паразитного низкочастотного аппаратного шума, возрастающего по мере виртуального снижения собственной частоты геофона.

Аппаратный шум сейсмических регистраторов традиционно представляют в виде спектральных плотностей мощности (СПМ). Эксперименты по сравнению записей аппаратного шума различных регистраторов показывают,

что его распределение по частотам может сильно варьироваться. В частотном диапазоне от 10 до 100 Гц значения СПМ могут отличаться на 1 порядок, а с уменьшением частоты до 0,01 Гц отличие может возрасти до 4 порядков. Следовательно, результаты низкочастотной деконволюции в зависимости от используемого регистратора могут значительно отличаться, и необходимо уметь прогнозировать эти различия.

### *Оценка возможностей метода*

Рассчитаем область достоверности результатов низкочастотной деконволюции, которая позволит определить, локальные землетрясения какой магнитуды в нее попадают. Снизу область будет ограничена аппаратным шумом регистратора, возросшим после обработки методом низкочастотной деконволюции и масштабированным чувствительностью датчика. Из алгоритма деконволюции намеренно исключен этап умножения на КЧХ «виртуального» геофона. Верхним ограничителем является клиппинг регистратора, который определяется разрядностью АЦП (а точнее его старшим значимым разрядом), коэффициентом перевода записей из целочисленного кода регистратора в электрический сигнал, а также зависит от выбранного коэффициента усиления.

Для сравнения аппаратного шума с сигналами от землетрясений, рассчитаем его октавный спектр. Октавный спектр среднеквадратического отклонения (СКО) легко получается из СПМ посредством умножения на частоту  $f$  и, в зависимости от способа представления СПМ, при необходимости вычислить квадратный корень из всего выражения. В результате этих преобразований октавный спектр должен быть выражен в единицах скорости (м/с).

Для оценки амплитуд сигналов от землетрясений различной магнитуды на разных гипоцентральных расстояниях используем соответствующие осредненные оценки (далее будем называть их октавными спектрами максимальных амплитуд ускорений) для сейсмологических записей, которые были опубликованы в работе [10]. Однако их необходимо предварительно перевести из ускорений в скорости посредством умножения на  $2\pi f$ . С учетом того, что для аппаратного шума отношение его удвоенной амплитуды (от минимума до максимума) к среднеквадратическому отклонению составляет 6-8 раз [11], можно корректно перейти от октавных спектров максимумов к октавным спектрам СКО.

Рассчитаем область достоверности для комплекта, состоящего из малошумящего регистратора SGD-SMH и низкочастотного геофона с повышенной чувствительностью GS-ONE LF (собственная частота 4,5 Гц, чувствительность 100,2 В/м/с), и наложим на нее октавные спектры от локальных землетрясений (рис. 2).

Даже с учетом того, что изображенные октавные спектры являются результатом осреднения (реальный разброс составляет приблизительно  $\pm 20$  дБ), данный комплект регистрирующей аппаратуры гарантированно обеспечивает регистрацию локальных землетрясений в целевом магнитудном диапазоне.

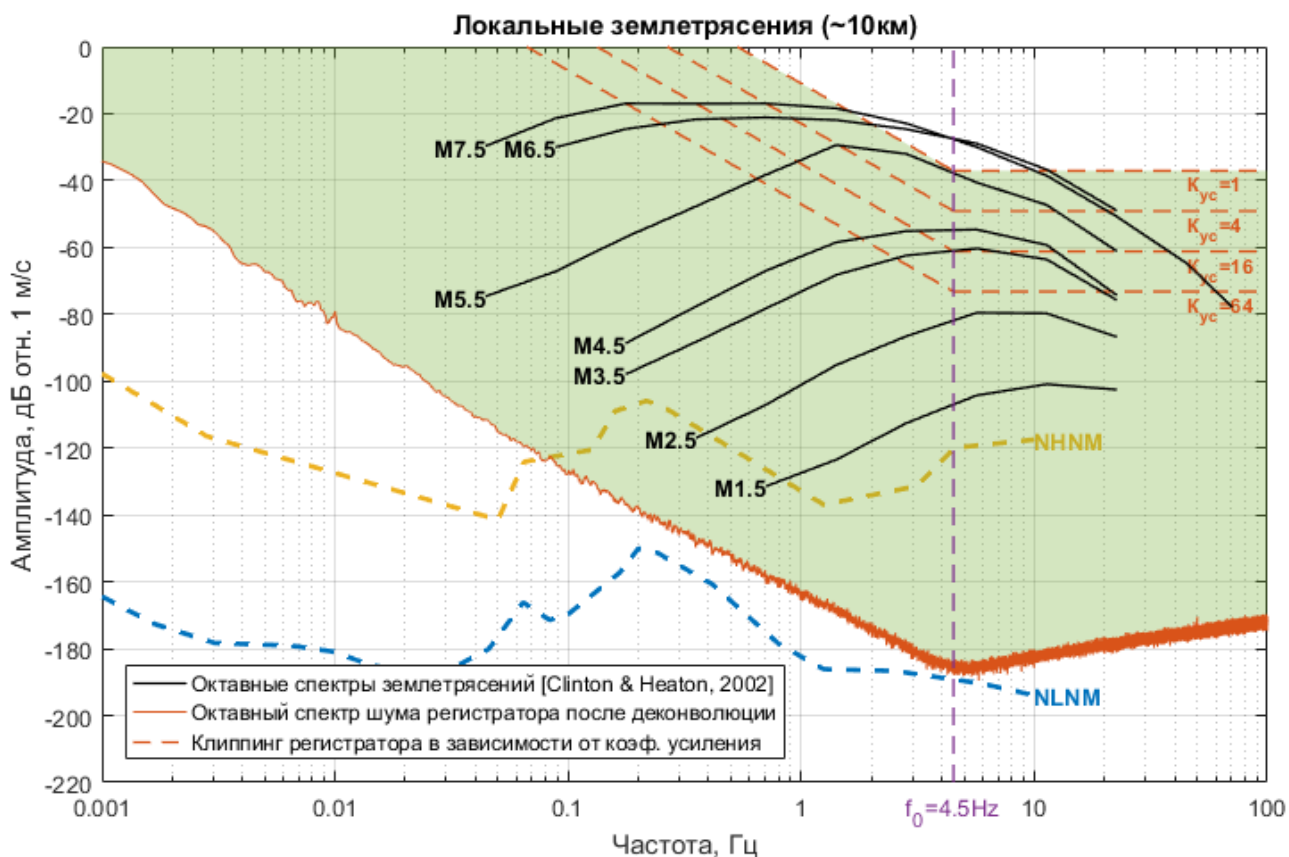


Рис. 2. Область достоверности результатов низкочастотной деконволюции, рассчитанная для регистратора SGD-SMH и низкочастотного геофона с повышенной чувствительностью GS-ONE LF применительно к локальным землетрясениям различной магнитуды

При выборе коэффициента усиления 16 раз, чувствительность геофона возрастет до 1600 В/м/с, что сопоставимо с сейсмометрами, используемыми в сейсмологии, что обеспечит регистрацию слабых землетрясений с магнитудами ниже 1,5. Надо учитывать, что это снизит верхнюю границу регистрируемых магнитуд приблизительно до 3,5, что тем не менее является достаточным для регистрации техногенных и большинства индуцированных землетрясений.

### Выводы

В работе продемонстрированы возможности использования геофонов с программно-скорректированной частотной характеристикой исходных записей в сетях локального сейсмологического мониторинга. На примере комплекта регистрационной аппаратуры, состоящего из низкошумящего регистратора и современного 4,5-герцового геофона, доказана возможность корректной регистрации локальных землетрясений в диапазоне магнитуд, характерном для задач сейсмического мониторинга месторождений и вулканов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. How big is a small earthquake? Challenges in determining microseismic magnitudes / J.M. Kendall, A. Butcher, A.L. Stork, J.P. Verdon, R. Luckett, B.J. Baptie // *First Break*. – 2019. – Vol. 37(2). – P. 51-56.
2. Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года ( $M_w=5.8$ ) на северо-западе о. Сахалин // *Вулканология и сейсмология*. – 2012. – № . – С.37-37.
3. Structure of volatile conduits beneath Gorely volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography / P.Y. Kuznetsov, I. Koulakov, A. Jakovlev, I. Abkadyrov, E. Deev, E.I. Gordeev, S. Senyukov, S. El Khrepy, N. Al Arifi // *Geosciences (Switzerland)*. – 2017. – Т. 7. – № 4. – С. 111-111.
4. Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in earthquake seismology. – Dordrecht: Springer, 2004. – Т. 358.
5. Короткопериодные сейсмометры в сейсмологии / Н.В. Кабыченко, А.Н. Беседина, С.Г. Волосов, С.А. Королев, Г.Г. Кочарян // *Сейсмические приборы*. – 2017. – Т. 53, – № 1. – С.44-65.
6. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // *Геология и геофизика*. – 2001. – Т. 42. – № 5. – С.852-863.
7. Дергач П.А., Юшин В.И. О «запредельных» возможностях электродинамических сейсмоприемников // *Сейсмические приборы*. – 2016. – Т. 52. – № 4. – С. 33-42.
8. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции / П.А. Дергач, Ц.А. Тубанов, В.И. Юшин, А.А. Дучков // *Сейсмические приборы*. – 2018. – Т. 54. – № 3. – С. 22-34.
9. Ли П. Руководство по выбору малощумящего усилителя // *Компоненты и технологии*. – 2010. – № 1. – С.46-51.
10. Дергач П.А., Юшин В.И. Теория и практика абсолютной калибровки сейсмических датчиков скачком смещения // *Сейсмические приборы*. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 51-65.
11. Clinton J.F., Heaton T.H. Potential Advantages of a Strong-motion Velocity Meter over a Strong-motion Accelerometer // *Seismological Research Letters*. – 2002. – Vol. 73(3). – P. 332-342.
12. Smith S.W. Statistics, Probability and Noise // *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. – 1999. – P. 11-34.

© П. А. Дергач, А. А. Дучков, В. И. Юшин, 2019