

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ ВИБРАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Г.С. Чернышов^{1,*}, Д.А. Литвиченко², В.В. Стекленив², А.А. Дучков¹

¹ФБГУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука» СО РАН, РФ, Новосибирск

²Группа компаний «Газпром нефть», РФ, Тюмень

© Коллектив авторов,
2024



Электронный адрес: chernyshovgs@ipgg.sbras.ru

Введение. Вибрационные источники сейсмических волн обладают рядом преимуществ перед взрывными: возможность работать в сложных поверхностных условиях, большее количество параметров возбуждения, позволяющих контролировать форму сейсмического сигнала, высокопроизводительные технологии проведения вибросейсмических работ позволяют сократить время получения данных. Но качество данных зачастую уступает взрывным источникам. Потеря качества связана с техническими проблемами генерации низких и высоких частот, нелинейными искажениями. Также при высокопроизводительных работах (slip-sweep) возникает дополнительный источник помех в виде сигнала от соседних возбуждений.

Цель. Тестирование различных методов обработки виброграмм для оценки их эффективности.

Материалы и методы. В статье рассматриваются несколько методов, направленных на повышение качества этапа перехода от сырых виброграмм к коррелограммам. Тестирование методов включает использование нестационарной фильтрации виброграмм, использование записи с плит вибратора (Ground Force) для корреляции и деконволюции виброграмм и подавление гармонических шумов от вторичных источников.

Результаты. Выделено два вида помех, на подавление которых направлены тестируемые методы: корреляционные помехи, гармонический шум. Причиной первого типа помех является несоответствие фактического вибрационного сигнала, передаваемого в геологическую среду, и пилотного свип-сигнала. Поэтому методы по подавлению направлены на поиск сигнала, приближенного к фактическому, или с использованием сигнала Ground Force. Подавление гармонических шумов актуально для высокопроизводительных работ, при которых возникает интерференция гармоник сигнала с последующего возбуждения и основной моды сигнала от основного возбуждения. Оценка эффективности методов проводилась на реальных данных.

Было показано, что стандартная корреляция виброграмм с пилотным свипом обладает фильтрующими свойствами, аналогичными переменной по времени полосовой фильтрации виброграмм. Деконволюция виброграмм с сигналом Ground Force может приводить к понижению уровня корреляционных шумов, но повышает уровень случайного шума на ближних удалениях. Гармонические помехи актуальные для высокопроизводительной вибросейсморазведки эффективно даются методом, не использующим сигнал Ground Force, за счет чего можно существенно сократить задержку между возбуждениями (slip-time).

Заключение. Проведена качественная и количественная оценка эффективности методов обработки вибрационных данных. Сформулированы рекомендации по применению рассмотренных методов.

Ключевые слова: вибрационная сейсморазведка, Ground Force, гармонический шум, деконволюция виброграмм

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чернышов Г.С., Литвиченко Д.А., Стекленив В.В., Дучков А.А. Анализ эффективности методов подавления помех вибрационных данных. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(3):17–25. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-17-25>

Статья поступила в редакцию 08.04.2024

Принята к публикации 18.05.2024

Опубликована 30.09.2024

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF NOISE REDUCTION METHODS FOR VIBRATION SEISMIC DATA

Gleb S. Chernyshov^{1,*}, Dmitriy A. Litvichenko², Vladimir V. Steklenev², Anton A. Duchkov¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, RF, Novosibirsk

²Gazprom нефt company group, RF, Tumen

E-mail: chernyshovgs@ipgg.sbras.ru

Background. Vibrating sources of seismic waves have a number of advantages over explosive ones: the ability to work in difficult surface conditions, a greater number of source parameters that allow you to control the shape of the seismic signal, high-performance technologies for vibroseismic work can reduce the time of data acquisition. But data quality is often inferior to explosive sources. The loss of quality is associated with technical problems in generating low and high frequencies and nonlinear distortions. Also, during high-performance work, an additional source of interference arises in the form of a signal from neighboring sources.

Aim. The article discusses several methods aimed at improving the quality of the transition stage from raw vibrograms to correlograms.

Materials and methods. The article discusses several methods aimed at improving the quality of the transition stage from raw vibrograms to correlograms. Testing of the methods includes the use of non-stationary filtering of vibrograms, the use of records from vibrator plates (Ground Force) for correlation and deconvolution of vibrograms, and the suppression of harmonic noise from secondary sources.

Results. There are two types of noise for attenuation: correlation noise and harmonic noise. The first type of noise is caused by a mismatch between the actual vibration signal and the pilot sweep. Therefore, suppression methods are aimed at searching for a signal close to the actual one, or using the Ground Force signal. Harmonic interference suppression is relevant for high-performance applications in which a harmonic signal from a secondary source interferes with the fundamental mode of the signal from the main source.

The effectiveness of the methods was evaluated by applying the methods to real data. It has been shown that standard correlation of vibrograms with a pilot sweep has filtering properties similar to time-variable bandpass filtering of vibrograms. Deconvolution of vibrograms with the Ground Force signal makes it possible to reduce the amplitudes of correlation noise, but increases the amplitude of random noise at short distances. Harmonic noise is effectively suppressed by a method that does not use a Ground Force signal, due to which the delay between excitations (slip-time) in high-performance methods can be significantly reduced.

Conclusions. A qualitative and quantitative assessment of the efficiency of vibration data processing methods was carried out. Recommendations for the application of the considered methods were formulated.

Keywords: vibroseis, Ground Force, harmonic noise, vibrogram deconvolution

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Chernyshov G.S., Litvichenko D.A., Steklenev V.V., Duchkov A.A. Analysis of the effectiveness of noise reduction methods for vibration seismic data. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(3):17–25. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-17-25>

Manuscript received 08.04.2024

Accepted 18.05.2024

Published 30.09.2024

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные источники сейсмических волн обладают рядом преимуществ перед взрывными: возможность работать в сложных поверхностных условиях, большее количество параметров возбуждения, позволяющих контролировать форму сейсмического сигнала, высокопроизводительные технологии проведения вибросейсмических работ позволяют сократить

источник помех в виде сигнала от соседних возбуждений.

Отличительными этапами обработки данных вибрационной сейсморазведки являются: 1) переход от виброграмм к коррелограммам; 2) приведение импульса к минимально-фазовому виду. Для повышения качества получаемых коррелограмм в литературе рассматриваются различные методы обработки исходных данных (виброграмм), от публикации к публикации результаты эффективности методов сильно варьируются и эффекты от применения одного и того же метода могут быть несогласованными. В производственном процессе в подавляющем большинстве случаев используются стандартные подходы. Например, для перехода к коррелограммам используется процедура корреляции с пилотным свипом, для устранения эффекта соседних источников при высокопроизводительных работах увеличивают задержку между возбуждениями (slip-time). Цель данной работы — показать результаты тестирования различных методов обработки виброграмм для оценки эффективности их применения. Тестирование методов включает использование нестационарной фильтрации виброграмм, использование записи с плит вибратора (Ground Force) для корреляции и деконволюции виброграмм и подавление гармонических шумов от вторичных источников.

ТЕСТИРОВАНИЕ РАЗНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ВИБРОГРАММ ПОКАЗАЛО, ЧТО ГАРМОНИЧЕСКИЕ ПОМЕХИ, АКТУАЛЬНЫЕ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ, ЭФФЕКТИВНО ДАВЯТСЯ МЕТОДОМ, НЕ ИСПОЛЬЗУЮЩИМ СИГНАЛ GROUND FORCE, ЗА СЧЕТ ЧЕГО МОЖНО СУЩЕСТВЕННО СОКРАЩАТЬ ЗАДЕРЖКУ МЕЖДУ ВОЗБУЖДЕНИЯМИ (SLIP-TIME).

время получения данных [1]. Но качество данных зачастую уступает взрывным источникам [2]. Потеря качества связана с техническими проблемами генерации низких и высоких частот, нелинейными искажениями, результатом становится несоответствие фактического сигнала, излучаемого в среду, и пилотного свип-сигнала. Также при высокопроизводительных работах (например, slip-sweep) возникает дополнительный

ВИДЫ ПОМЕХ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В работе выделяется два типа помех, на уменьшение которых направлены рассматриваемые методы.

Корреляционным шумом называют вторичные экстремумы импульса Клаудера, возникающие в результате несоответствия фактического свипа записываемого в приемниках и пилотного свип-сигнала, с которым коррелируют виброграммы. Легче всего оценить амплитуду такого вида помех в областях до первых вступлений, хотя шумы будут генерироваться любым сигналом волнового поля. На **рис. 1** приведена коррелограмма, красным выделены области прослеживания корреляционных шумов от сигнала в первых вступлениях (слева) и от сигнала поверхностной волны (справа). Также в эту область попадают вторичные экстремумы импульса Клаудера, связанные с разрешенностью генерируемого свип-сигнала, которая контролируется параметрами пилотного свипа (полоса частот, скорость развертки). Проблемы, которые могут быть вызваны наличием корреляционных шумов в обработке: сложность пикировки времен первых вступлений, приведение к минимально-фазовому виду, осложненное помехами волновое поле. *Гармонический шум.* При генерации вибрационных сигналов неизбежно возникновение нелинейных процессов, что приводит к появлению частот, кратных частотам пилотного свип-сигнала. При традиционном подходе вибросейсмических работ (flip-flop) наличие

таких помех приводит к искажению основной моды излучаемого свипа, но сами гармонические помехи имеют малые амплитуды и присутствуют на коррелограммах до первых вступлений, вследствие чего не представляют проблем при обработке. Для высокопроизводительных работ (slip-sweep) гармоники свипа от последующего воздействия могут накладываться на сигнал от текущего возбуждения (**рис. 2**), и возникает необходимость в подавлении таких шумов.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВИБРОГРАММ

Корреляция

Стандартным подходом к получению коррелограмм является взаимная корреляция трасс виброграммы с пилотным свипом. В Фурье-области при этом происходит перемножение спектров трасс и пилотного свипа, эффект во многом аналогичен полосовой фильтрации, частоты за интервалом пилотного свипа в сигнале фильтруются. Более детально сформулировать фильтрующие свойства корреляции можно в области спектрограмм — результата применения преобразования Габора к трассе. На **рис. 3** приведены спектрограммы по порядку: 1) пилотного свипа; 2) трассы виброграммы; 3) трассы полной коррелограммы; 4) трассы коррелограммы, обрезанной в целевом интервале времени, также белым отмечены эквивалентные области спектра на виброграмме и коррелограмме. В пространстве спектрограмм процедура корреляции приводит к вертикали основную моду пилотного

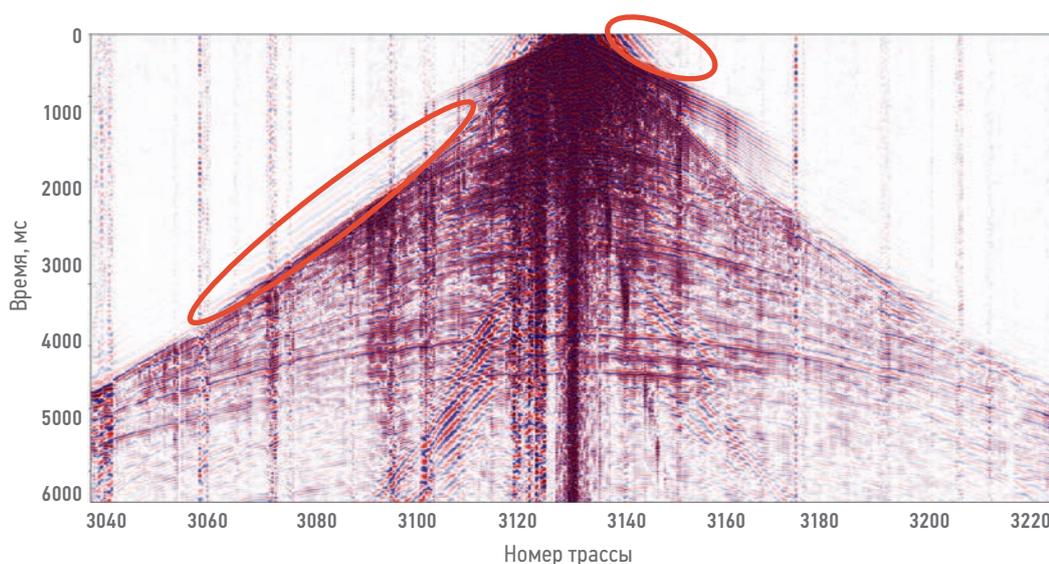


Рис. 1. Пример коррелограммы, красным указаны области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений. Составлено авторами

Fig. 1. Example of a correlogram, in red — areas of tracking correlation noise from the first arrivals. Compiled by the authors

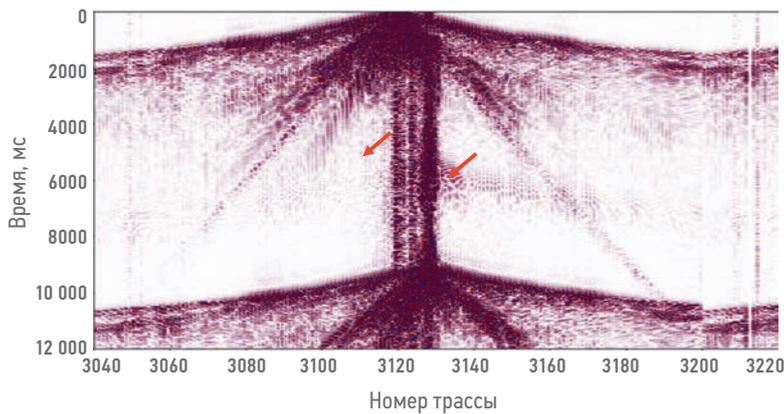


Рис. 2. Correlogram from two consecutive sources, red indicates the areas of tracking harmonic noise from the second source. Compiled by the authors

Fig. 2. Correlogram from two consecutive sources, red indicates the areas of tracking harmonic noise from the second source. Compiled by the authors

сви́па, что будет аналогично для любой функции развертки частоты сви́па, не только для линейного. При этом сигнал, не попадающий в целевую полосу частота–время, на виброграмме не войдет в финальную коррелограмму. Таким образом, корреляция имеет

эффект переменной по времени полосовой фильтрации, применяемой к виброграмме. Как было описано выше, основной причиной наличия корреляционных шумов является несоответствие пилотного сви́па-сигнала фактическому, поэтому в основе большинства методов уменьшения корреляционных шумов лежит расчет сви́па-сигналов, приближенных к фактическому. Одним из таких сигналов считается взвешенная сумма сигналов с акселерометров, установленных на плитах вибраторов — Ground Force (GF). Такой сигнал используется при проведении сейсморазведочных работ для контроля качества работы вибратора, хотя сигнал не полностью учитывает искажение сви́па при передаче его от плиты в грунт, GF будет ближе к истинному сигналу, чем пилотный сви́п [3, 4]. Напрямую GF не может быть использован для корреляции, так как содержит гармонические колебания. На **рис. 4** показана процедура корреляции виброграммы с сигналом GF в области спектрограмм. Как видно по спектрограмме коррелограммы, гармоники, присутствующие в GF, попадают на положительные времена в коррелограммах, что приводит к появлению шумов в целевой области.

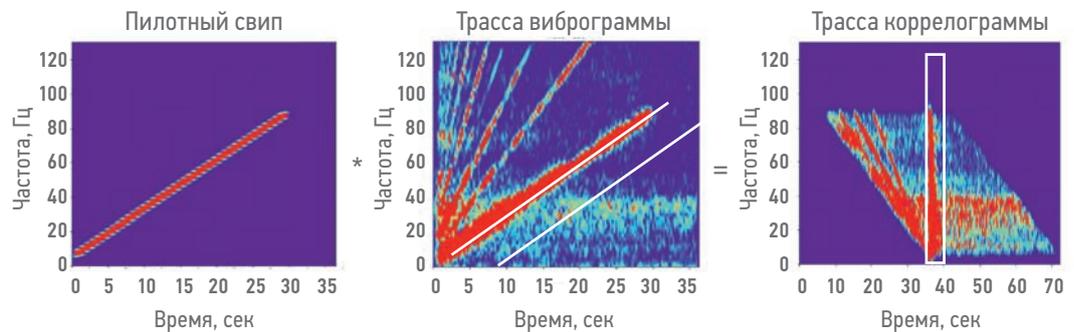


Рис. 3. Спектрограммы трасс, участвующих в процедуре корреляции, слева — пилотного сви́па, в центре — виброграммы, справа — коррелограммы, белым указана целевая область времен. Compiled by the authors

Fig. 3. Spectrograms of the traces involved in the correlation procedure, the pilot sweep (left), vibrograms (middle), correlograms (right), in white — the target time region. Compiled by the authors

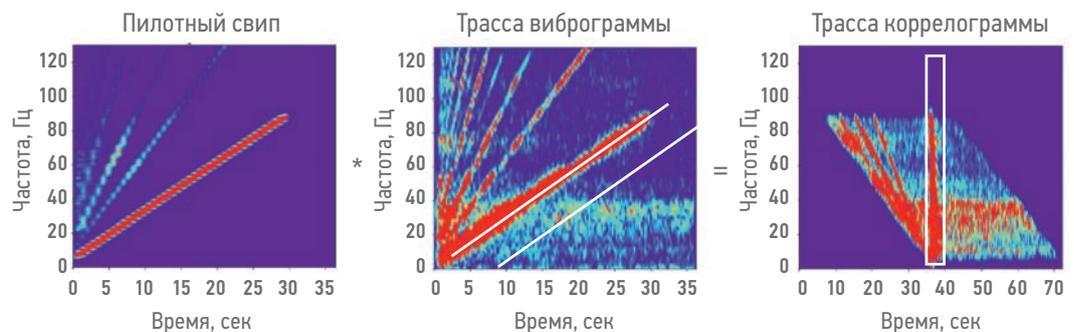


Рис. 4. Спектрограммы трасс, участвующих в процедуре корреляции, слева — сигнала GF, в центре — виброграммы, справа — коррелограммы, белым указана целевая область. Compiled by the authors

Fig. 4. Spectrograms of the traces involved in the correlation procedure, the GF signal (left), vibrograms (middle), correlograms (right), in white — the target area. Compiled by the authors

Также стоит отметить, что искажение свипа гармониками выражается не только в наличии самих гармонических колебаний, но и в изменении спектра основной моды свип-сигнала. На тестируемых данных такие искажения были незначительными и не приводили к уменьшению корреляционных помех при учете.

Деконволюция

Альтернативным способом перехода от виброграмм к коррелограмме является детерминистическая деконволюция. Если при корреляции в области одномерных спектров Фурье происходит перемножение спектров, то при деконволюции спектры делятся. Деконволюция позволяет использовать сигнал GF вместо пилотного, так как в отличие от корреляции гармоники GF не накладываются на положительные времена коррелограммы. Различные положительные эффекты применения детерминистической деконволюции в частотной области рассматриваются в [5, 6, 7]. В ходе тестирования рассмотрены результаты применения деконволюции с использованием пилотного свипа и GF. В качестве метрик качества использовались амплитуды в области корреляционных шумов до первых вступлений и на поздних временах трасс ближних удалений (рис. 5). Затем рассчитывалось отношение полученных метрик между результатами деконволюции и корреляцией с пилотным свипом. Деконволюция с сигналом GF понижает уровень корреляционных шумов в 3 раза, при этом повышает уровень случайного шума в 3,8 раза. Деконволюция

с пилотным свипом понижает уровень корреляционных шумов в 1,1 раза, повышает уровень случайного шума в 1,5 раза. Наилучшим подходом для данных стала бы комбинация корреляции трасс ближних удалений и деконволюция трасс средних и больших удалений.

Дополнительно протестирован метод расчета свип-сигнала, приближенного к фактическому, по виброграммам с одного пункта возбуждения, одинаковой полосы частот, но разной длительности [2]. Метод применен на том же наборе данных, эффективность подавления корреляционных помех при деконволюции с получаемым сигналом оказалось средним между использованием пилотного свипа и GF в деконволюции.

Подавление гармонически шумов

Как было отмечено выше, подавление гармонических шумов особо актуально для высокопроизводительных вибросейсмических работ. Метод slip-sweep предполагает одновременную работу источников на нескольких пунктах возбуждения (ПВ) с некоторой задержкой (slip-time). Величина задержки, подбираемая как параметр источника в рамках опытно-методических работ (ОМР), прямо пропорциональна производительности работ. При этом задержку часто завышают, обосновывая увеличенным уровнем помех на больших временах коррелограммы (рис. 2). Наличие методов эффективного подавления такой помехи может повысить производительность работ. Подавляющее большинство методов подавления гармонических шумов основано

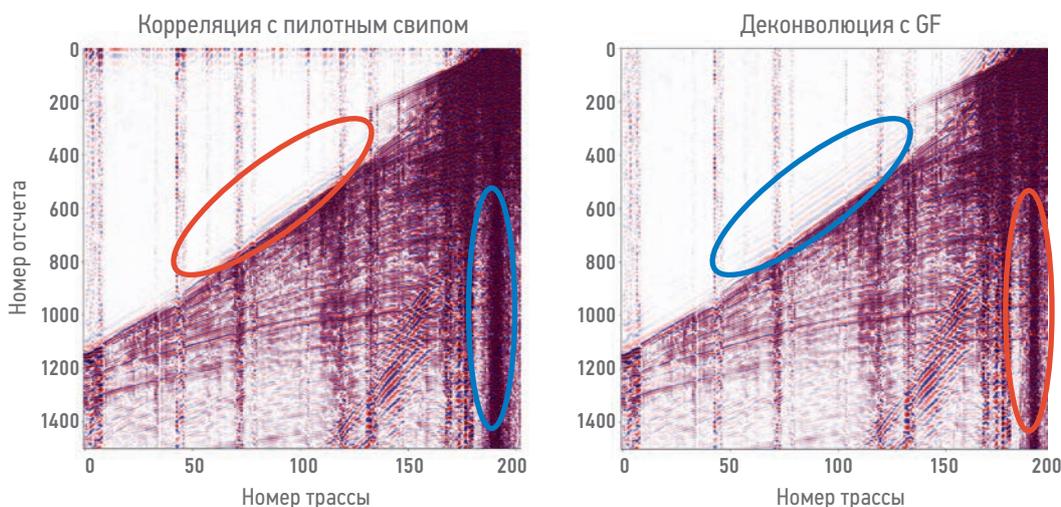


Рис. 5. Коррелограммы полученные при: слева — корреляции с пилотным свипом, справа — деконволюцией с сигналом GF, помечены области прослеживания корреляционных шумов до первых вступлений и случайного шума на ближних удалениях. Составлено авторами

Fig. 5. Correlograms obtained with: correlation with a pilot sweep (left), deconvolution with a GF signal (right), the areas of tracking correlation noise from the first arrivals and random noise at near offsets are marked. Compiled by the authors

на использовании сигнала GF. Оценка эффективности таких методов, реализованных в коммерческих программах обработки сейсмических данных, приводится в работе [8]. Так как обычно сигнал GF не сохраняется в результате производственных работ, особое внимание уделим методам, не требующим его наличия: «следающая фильтрация» виброграмм [9, 10] и метод генерации модели гармонического шума [11].

Метод «следающая фильтрация», представленная в двух работах [9, 10], имеет разную реализацию. Суть метода заключается в построении серии полосовых фильтров с переменной полосой фильтрации от времени и с применением к трассам виброграмм. Целью такой фильтрации является удаление сигнала вне целевой полосы, показанной на спектрограмме трассы виброграммы (рис. 3). В данной статье предлагается альтернативный метод, основанный на применении маски фильтра в области спектрограмм. На рис. 6 показан результат применения фильтрации к виброграмме метода slip-sweep как во временной области, так и в области спектрограмм (для одной трассы). Видно, что вторичные возбуждения на виброграмме хорошо фильтруются, при этом можно выделить наличие гармоники от второго возбуждения на спектрограмме после фильтрации, которая

находится в интерференции с основной модой свипа первого возбуждения.

При оценке эффекта процедуры корреляции виброграмм сделан вывод о фильтрующих свойствах процедуры аналогичных переменной по времени фильтрации, применяемой к виброграммам. Этот вывод подтверждается и результатами тестирования на сейсмограммах slip-sweep. На рис. 7 приводятся спектрограммы трасс коррелограмм до и после «следающей фильтрации». Как видно в целевой полосе времен 0–6 сек., спектры идентичны, в то время как во временной области разницы отсутствует. На основе этого сделан вывод о высокой эффективности «следающей фильтрации» на уровне виброграмм и отсутствии эффекта на коррелограммах. Такой метод фильтрации может подойти для более детального анализа виброграмм метода slip-sweep.

В рамках данной работы также апробирован метод генерации модели гармонического шума [11], который состоит из пяти основных этапов:

- 1) генерация свипа гармонических колебаний;
- 2) расчет функции взаимной корреляции (ФВК) между пилотным свипом и свипом гармоники с этапа 1;

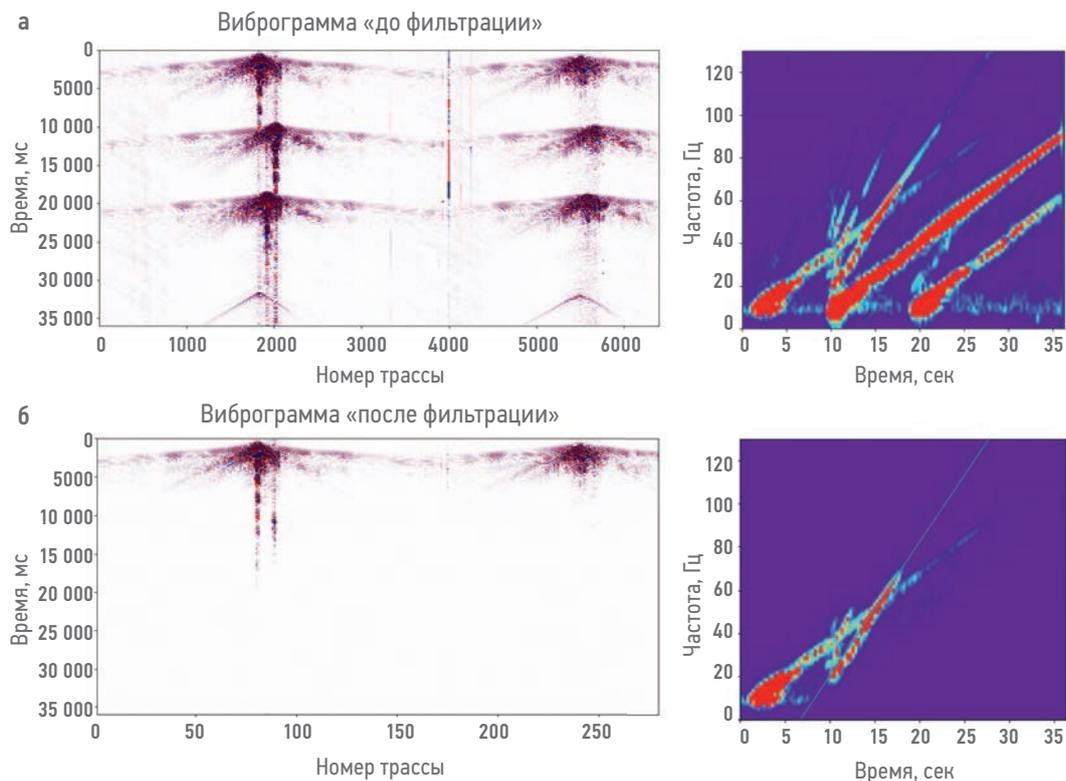


Рис. 6. Виброграммы с спектрограммами трасс, а — до, б — после «следающей фильтрации». Составлено авторами
 Fig. 6. Vibrograms with spectrograms of traces, a — before, б — after "non-stationary filtering". Compiled by the authors

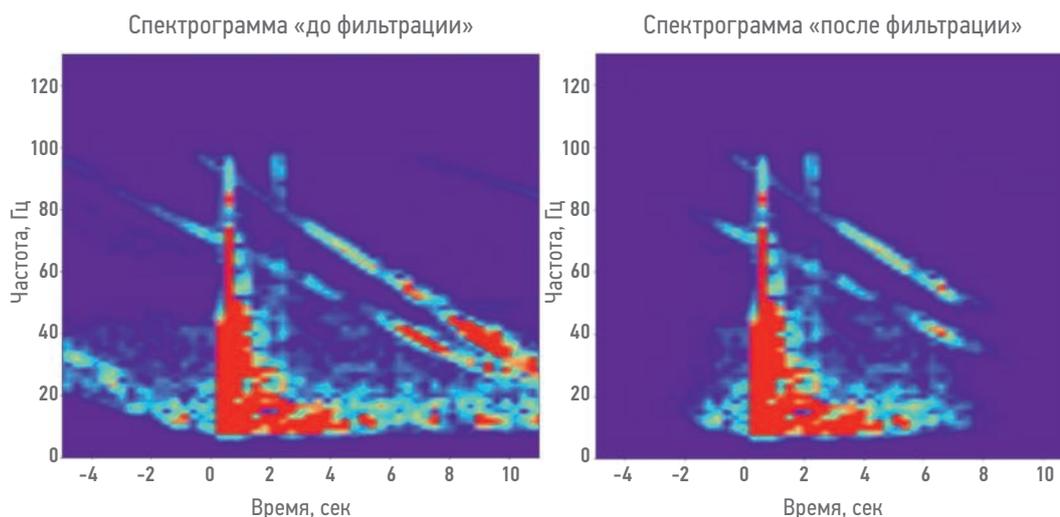


Рис. 7. Спектрограммы трасс коррелограмм, слева — до фильтрации, справа — после фильтрации виброграммы.
Составлено авторами
Fig. 7. Spectrograms of correlagram traces, before filtering (left), after filtering (right) the vibrogram.
Compiled by the authors

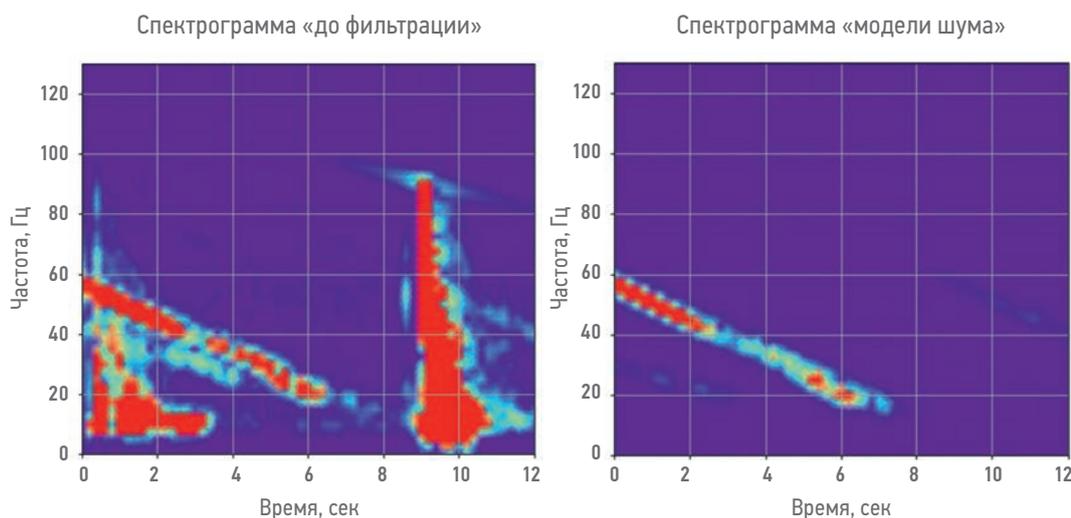


Рис. 8. Спектрограммы трасс, слева — коррелограммы до фильтрации, справа — модели гармонического шума.
Составлено авторами
Fig. 8. Spectrograms, correlagrams before filtering (left), harmonic noise models (right). Compiled by the authors

- 3) расчет полной коррелограммы по данным;
- 4) свертка полной коррелограммы с ФВК свивов с этапа 2;
- 5) адаптивное вычитание полученной модели гармонического шума из исходной коррелограммы.

Тестирование метода проводилось на данных с длиной свива 30 сек. и задержкой (slip-time) между возбуждениями 10 сек. (30 %). Спектрограмма трассы, получаемой модели шума, приведена на **рис. 8**, где для сравнения приводится спектрограмма трассы исходной коррелограммы, осложненной гармоническим шумом от второго возбуждения.

На **рисунке 9** показан результат адаптивного вычитания модели гармонического шума из коррелограммы, стрелочками показана область прослеживания шума. Для оценки эффективности фильтрации также приводится коррелограмма, полученная из данных с slip-time 15 сек (50 %) (**рис. 9**). Такая задержка была выбрана в рамках ОМР как оптимальная, при дальнейшем увеличении задержки уровень гармонических шумов не увеличивается. На коррелограммах после фильтрации и с увеличенным slip-time наблюдается одинаковый уровень помех на поздних временах, что говорит о высокой эффективности тестируемого метода подавления гармонических помех.

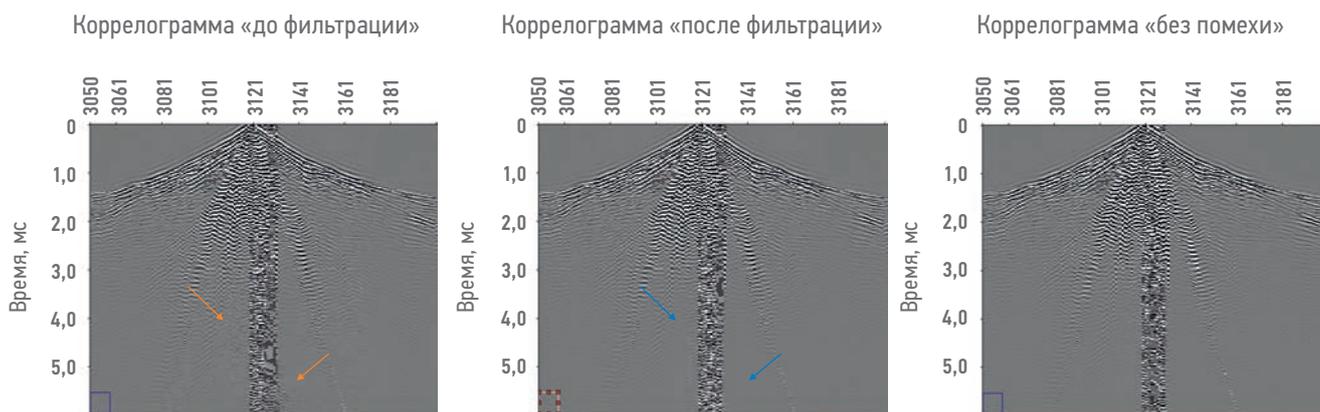


Рис. 9. Коррелограммы: до фильтрации slip-time = 30 %, после фильтрации гармонических шумов slip-time = 30 %, без гармонических шумов с увеличенным slip-time = 50 %, стрелками указываются области прослеживания гармонических шумов. Составлено авторами
Fig. 9. Correlograms, before filtering (slip-time = 30 %), after filtering harmonic noise (slip-time = 30 %), without harmonic noise with increased (slip-time = 50 %), arrows indicate areas of harmonic noise. Compiled by the authors

ВЫВОДЫ

В данной работе протестированы различные подходы к обработке виброграмм и проведена оценка их эффективности по результатам применения к реальным данным. Сделаны следующие выводы.

1. Корреляция виброграмм с пилотным свипом обладает фильтрующими свойствами, схожими с переменной по времени полосовой фильтрацией виброграмм.
2. Деконволюция виброграмм с использованием сигнала GF позволяет понизить уровень корреляционных помех, но повышает уровень случайного шума на ближних

удалениях. Для решения данного вопроса предложен оптимальный подход с комбинированием процедур корреляции и деконволюции для разных удалений.

3. Метод подавления гармонических помех «следающая фильтрация» позволяет значительно подавить помехи на уровне виброграмм, но не имеет эффекта на коррелограммах.
4. Гармонические помехи, характерные для высокопроизводительных виброрейсмических работ, с высокой эффективностью подавляются методом генерации модели гармонического шума, не требующим наличия сигнала GF.

Список литературы

1. Шнейерсон М.Б. (ред.). Вибрационная сейсморазведка. — М.: Недра, 1990.
2. Фиников Д.Б. Способ сейсморазведки с вибрационными источниками / Д.Б. Фиников, А.В. Шалашников // Геомодель 2021: Материалы 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 06–10 сентября 2021 года. — Москва: ООО «EAGE Геомодель», 2021. — С. 18.
3. Van Der Veen M., Brouwer J., Helbig K. Weighted sum method for calculating ground force: An evaluation by using a portable vibrator system // Geophysical Prospecting. — 1999. — Т. 47. — № 3. — С. 251–267.
4. Saragiotis C., Scholtz P., Bagaini C. On the accuracy of the ground force estimated in vibroseis acquisition // Geophysical Prospecting. — 2010. — Т. 58. — № 1. — С. 69–80.
5. Poletto F. et al. Acquisition and deconvolution of seismic signals by different methods to perform direct ground-force measurements // Journal of Applied Geophysics. — 2016. — Т. 135. — С. 191–203.
6. Baradello L., Accaino F. Vibroseis deconvolution: A comparison of pre and post correlation vibroseis deconvolution data in real noisy data // Journal of Applied Geophysics. — 2013. — Т. 92. — С. 50–56.
7. Ziolkowski A. Review of vibroseis data acquisition and processing for better amplitudes: adjusting the sweep and deconvolution for the time-derivative of the true groundforce // Geophysical Prospecting. — 2010. — Т. 58. — № 1. — С. 41–54.
8. Ануленко А.С., Гафаров Р.М., Сираев И.А. Анализ эффективности технологий подавления эффектов наложения гармонических искажений, возникающих при выполнении сейсморазведочных работ методом Slip-Sweep // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2023. — № 1. — С. 15–28.
9. Гафаров Р.М. Применение следающей фильтрации при обработке данных Slip sweep // Геофизика. — 2012. — № 4. — С. 47–53.
10. Долгих Ю.Н., Кайгородов Е.П., Глебов А.А. Многозональная адаптивная обработка виброграмм как перспективное направление повышения качества и информативности современной сейсморазведки // Современные технологии нефтегазовой геофизики. — 2019. — С. 32–39.
11. Денисов М.С., Егоров А.А. Оптимизационная рекурсивная фильтрация как способ подавления гармоник в методе виброрейс // Геофизические технологии. — 2020. — № 2. — С. 23–53.

References

1. Shneerson M.B. *Vibration seismic exploration*. — Moscow: Nedra, 1990.
2. Finikov D.B. Method of seismic exploration with vibration sources / D.B. Finikov, A.V. Shalashnikov // *Geomodel, 2021: Proceedings of the 23rd conference on geological exploration and development of oil and gas fields, Gelendzhik, September 06–10, 2021*. Moscow: ООО «EAGE Geomodel», 2021. P. 18.
3. Van Der Veen M., Brouwer J., Helbig K. Weighted sum method for calculating ground force: An evaluation by using a portable vibrator system // *Geophysical Prospecting*. 1999, vol. 47, no. 3, pp. 251–267.

4. Saragiotis C., Scholtz P., Bagaini C. On the accuracy of the ground force estimated in vibroseis acquisition // *Geophysical Prospecting*. 2010, vol. 58, no. 1, pp. 69–80.
5. Poletto F. et al. Acquisition and deconvolution of seismic signals by different methods to perform direct ground-force measurements // *Journal of Applied Geophysics*. 2016, vol. 135, pp. 191–203.
6. Baradello L., Accaino F. Vibroseis deconvolution: A comparison of pre and post correlation vibroseis deconvolution data in real noisy data // *Journal of Applied Geophysics*. 2013, vol. 92, pp. 50–56.
7. Ziolkowski A. Review of vibroseis data acquisition and processing for better amplitudes: adjusting the sweep and deconvolving for the time-derivative of the true groundforce // *Geophysical Prospecting*. 2010, vol. 58, no. 1, pp. 41–54.
8. Akulenko A.S., Gafarov R.M., Siraev I.A. Analysis of the effectiveness of technologies for suppressing the effects of superimposed harmonic distortions arising during seismic exploration using the Slip-Sweep method // *Pribory i sistemy razvedochnoj geofiziki*. 2023, no. 1, pp. 15–28.
9. Gafarov R.M. The use of the tracking filter for processing sleep sweep // *Geophysics*. 2012, no. 4, pp. 47–53.
10. Dolgih Yu.N., Kajgorodov E.P., Glebov A.A. Multi-zone adaptive processing of vibrograms as a promising direction for increasing the quality and information content of modern seismic exploration // *Sovremennye tekhnologii nelegazovoj geofiziki*. 2019, pp. 32–39.
11. Denisov M.S., Egorov A.A. Optimization recursive filtering as a way to suppress harmonics in the vibroseis method // *Geophysical technologies*. 2020, no. 2, pp. 23–53.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Г.С. Чернышов — разработка и реализация алгоритмов, подготовка статьи, окончательное утверждение публикуемой версии статьи, согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Д.А. Литвиченко — апробация алгоритмов на реальных данных, анализ результатов применения алгоритмов, разработка концепции статьи.

В.В. Стекленив — сопровождение реализации алгоритмов, анализ результатов применения алгоритмов.

А.А. Дучков — сопровождение разработки алгоритмов, участие в подготовке статьи к публикации.

Gleb S. Chernyshov — development and implementation of algorithms, preparation of the article, final approval of the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Dmitry A. Litvichenko — testing of algorithms on real data, analysis of the results of applying algorithms, development of the concept of the article.

Vladimir V. Steklenev — support for the implementation of algorithms, analysis of the results of applying algorithms.

Anton A. Duchkov — support for the development of algorithms, participation in the preparation of the article for publication.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Глеб Станиславович Чернышов* — научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН) Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3.
e-mail: ChernyshovGS@ipgg.sbras.ru
SPIN-код: 8673-5897
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7752-5898>
Researcher ID: N-9676-2017

Дмитрий Александрович Литвиченко — эксперт по обработке данных сейсморазведочных работ, Группа компаний «Газпром нефть»

Владимир Васильевич Стекленив — ведущий инженер НОЦГПННГУ, ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Антон Альбертович Дучков — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН)

Gleb S. Chernyshov* — Laboratory of seismic dynamic analysis, researcher, IPGG SB RAS 3 Koptug ave., 630090, Novosibirsk, Russia.
e-mail: ChernyshovGS@ipgg.sbras.ru
SPIN-code: 8673-5897
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7752-5898>
Researcher ID: N-9676-2017

Dmitry A. Litvichenko — Head of Seismic Data Modeling, Gazprom нефt company group

Vladimir V. Steklenev — Leading engineer, Novosibirsk National Research State University»

Anton A. Duchkov — Cand. of Sci. (Phys. and Math.), senior scientific worker, Laboratory of Seismic Dynamic Analysis department head, IPGG SB RAS

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author