



ОПРОБОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИОННОЙ РЕКУРСИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ГАРМОНИК НА МОДЕЛЬНЫХ И ПОЛЕВЫХ КОРРЕЛОГРАММАХ

М.С. Денисов¹, А.А. Егоров¹, М.Б. Шнеерсон²

¹ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия,

²Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,

119991, Москва, Ленинский пр., 65, Россия,

e-mail: denisovms@gmail.com

Исследуются возможности алгоритма удаления гармонических искажений вибросигнала на модельных и полевых данных. На первом этапе производится прогнозирование помехи. На втором – ее адаптивное вычитание из исходных коррелограмм. Алгоритм демонстрирует хорошую работоспособность, и наиболее явно его преимущества проявляются при обработке данных, полученных по методике слип-свип.

Адаптивное вычитание; гармоники; коррелограмма

TESTING THE OPTIMIZATION-BASED RECURSIVE FILTERING ALGORITHM TO SUPPRESS HARMONICS ON MODEL AND FIELD CORRELOGRAMS

M.S. Denisov¹, A.A. Egorov¹, M.B. Shneerson²

¹GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze Str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,

²Gubkin National University of Oil and Gas, Leninsky prosp., 65, Moscow, 119991, Russia,

e-mail: denisovms@gmail.com

The performance of the algorithm for removing harmonic noise distortions of the vibroseis wavelet on the synthetic and the field data is studied. At the first stage, the noise is predicted. At the second stage, its adaptive subtraction from the original correlograms is performed. The algorithm demonstrates good performance, most clearly its advantages are manifested in slip-sweep data processing.

Adaptive subtraction; harmonics; correlogram

ВВЕДЕНИЕ

В первой статье цикла была получена математическая модель вибросейсмического импульса, осложненного гармониками, которые в рамках нашего исследования рассматриваются как помеха [Денисов, Егоров, 2019а]. На основании модели выведен алгоритм, позволяющий устранять гармоники. Подробному рассмотрению алгоритма посвящена вторая статья цикла [Денисов, Егоров, 2019б]. Теперь

мы приступаем к его тестированию на модельных и реальных данных. Это потребовало расширения авторского коллектива с целью привлечения специалиста, имеющего достаточный опыт обработки и интерпретации вибросейсмических данных, в том числе, в области проблемы гармоник [Жуков, Шнеерсон, 2000].

Напомним, что расчеты, производимые в соответствии с алгоритмом, сводятся к предсказанию помех с последующим их адаптивным вычитанием из исходной записи. Полученный линеаризованный оператор $d_{(KM)}$ удаляет все гармоники до M -го порядка включительно, при этом используется K итераций прогнозирования. Как правило, следует удалять две старшие гармоники, т. е. 2-го и 3-го порядков. Если амплитуды гармоник невелики по сравнению с амплитудой основного свипа (а именно так почти всегда и бывает), то имеет смысл ограничиться одной итерацией прогнозирования. В противном случае число итераций увеличивается.

Последовательность вычислительных процедур выглядит следующим образом:

- 1) *получение коррелограммы* – корреляция исходных трасс с исходным, теоретическим свип-сигналом,
- 2) *прогнозирование помех* – свертка коррелограммы с функциями взаимной корреляции (ФВК) свипов,
- 3) *адаптивное вычитание* – оценивание набора оптимальных операторов по критерию минимума энергии результата вычитания.

Статистическая надежность оценок на этапе адаптивного вычитания повышается путем поиска единого набора фильтров для одной сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ). Рассуждая в терминах теории статистического оценивания, трассы такой сейсмограммы оказываются ансамблем реализаций. Известно, что гармоники обусловлены не только конструкцией самого вибратора, но и условиями контакта плиты с грунтом. Следовательно, гармоники на трассах, полученных при одном возбуждении вибросигнала, т. е. сгруппированных в сейсмограмму ОПВ, будут одинаковыми, что позволяет рассматривать их как ансамбль.

МОДЕЛЬНАЯ ТРАССА

Используемая нами модель искаженного гармониками сложного вибросейсмического импульса записывается в виде

$$q(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) * q_m(t), \quad (1)$$

где t – индекс дискретного времени, q_m – свип-сигнал m -й гармоники, $a_m(t)$ – неизвестные фильтры, которые требуется оценить. Мы условились полагать, что q_1 – основной свип, $a_1(t) \equiv \delta(t)$ – «дискретная дельта-функция». Основной свип является линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) сигналом. Звездочка обозначает свертку. Мы также ввели понятие ФВК свипов m -й и l -й гармоник:

$$c_{ml}(t) = q_m(t) * q_l(-t).$$

Виброграмма $v(t)$ является сверткой исходного импульса с последовательностью коэффициентов отражения $r(t)$ и фильтром $p(t)$:

$$v(t) = r(t) * q(t) * p(t),$$

где $p(t)$ описывает эффект влияния верхней части разреза (ВЧР) на сигнал: при прохождении ВЧР сигнал преимущественно теряет высокочастотные компоненты. В результате корреляции виброграммы с основным свипом q_1 получаем коррелограмму z_1 :

$$z_1(t) = v(t) * q_1(-t).$$

Функция $r(t)$ является реализацией случайного процесса типа белого шума, и для ее моделирования был посчитан фрагмент пуассоновского потока случайных дельта-импульсов, амплитуды которых распределены по нормальному закону. Имитируя эффект затухания за счет геометрического расхождения, мы умножили полученный фрагмент на убывающую функцию $1/t^2$. При моделировании основного свип-сигнала использовались граничные частоты $f_{\min} = 8$ Гц и $f_{\max} = 80$ Гц, а его длительность составила 5 с. Для получения сложного импульса (1) к q_1 были добавлены гармоники 2-го и 3-го порядков: q_2 и q_3 , а в качестве операторов были использованы $a_2(t) = 0.35$ и $a_3(t) = 0.2$. Для удаления гармоник выбран фильтр $d_{(13)}$, реализующий одну итерацию прогнозирования помехи. Полученная в результате моделирования коррелограмма показана на рис. 1, а. На ней выделяются как сфокусированные в результате корреляционного преобразования импульсы, так и помехи, которые оказываются наиболее интенсивными в области отрицательных времен, т. е. до первых вступлений. Это, однако, не означает, что возможно удаление шума путем простого обнуления (мьютинга) волнового поля в этой области. Менее интенсивные помехи, связанные с сигналами, регистрируемыми на больших временах, накладываются на полезную часть записи и интерферируют с отражениями от целевых горизонтов. Характерный пример такой интерференции на рисунке указан стрелкой. Кроме того, если обрабатываются данные, полученные по методике слип-свип, то на вход поступает суперпозиция виброграмм. После корреляции составной протяженной виброграммы с опорным свип-сигналом гармоники от последующей записи окажутся наложенными на сигнал предыдущей записи. Ситуацию усугубляет тот факт, что за счет эффекта геометрического расхождения амплитуда сигналов быстро затухает, поэтому высокоамплитудные помехи, связанные с интенсивными сигналами в области первых вступлений, накладываются на слабые волны на больших временах регистрации предыдущей коррелограммы. После этого разборка общей записи на отдельные сейсмограммы затруднена.

Спрогнозированная модель шумов второй гармоники изображена на рис. 1, б, а третьей гармоники – на рис. 1, в. Напомним, что прогнозирование m -й гармоники производится путем свертки коррелограммы с ФВК c_{m1} . Очевидно, что такое преобразование достаточно точно воспроизводит помеху. Из рисунков также следует, что в данном случае можно ограничиться одной итерацией

прогнозирования, так как амплитуда гармоник невелика, а это значит, что геометрическая прогрессия, которой описывается спектральная характеристика оператора, быстро сходится (подробнее об особенностях оператора см. [Денисов, Егоров, 2019б]). Трасса, полученная в результате адаптивного вычитания модели помех из исходной коррелограммы, представлена на рис. 1, г. Желаемая коррелограмма (т. е. не содержащая гармоник) приведена для сравнения на рис. 1, д. Важно отметить, что удалось подавить шум после первых вступлений, накладывающийся на целевые отражения. Большинство существующих методов подавления гармоник не позволяет производить удаление такой помехи.

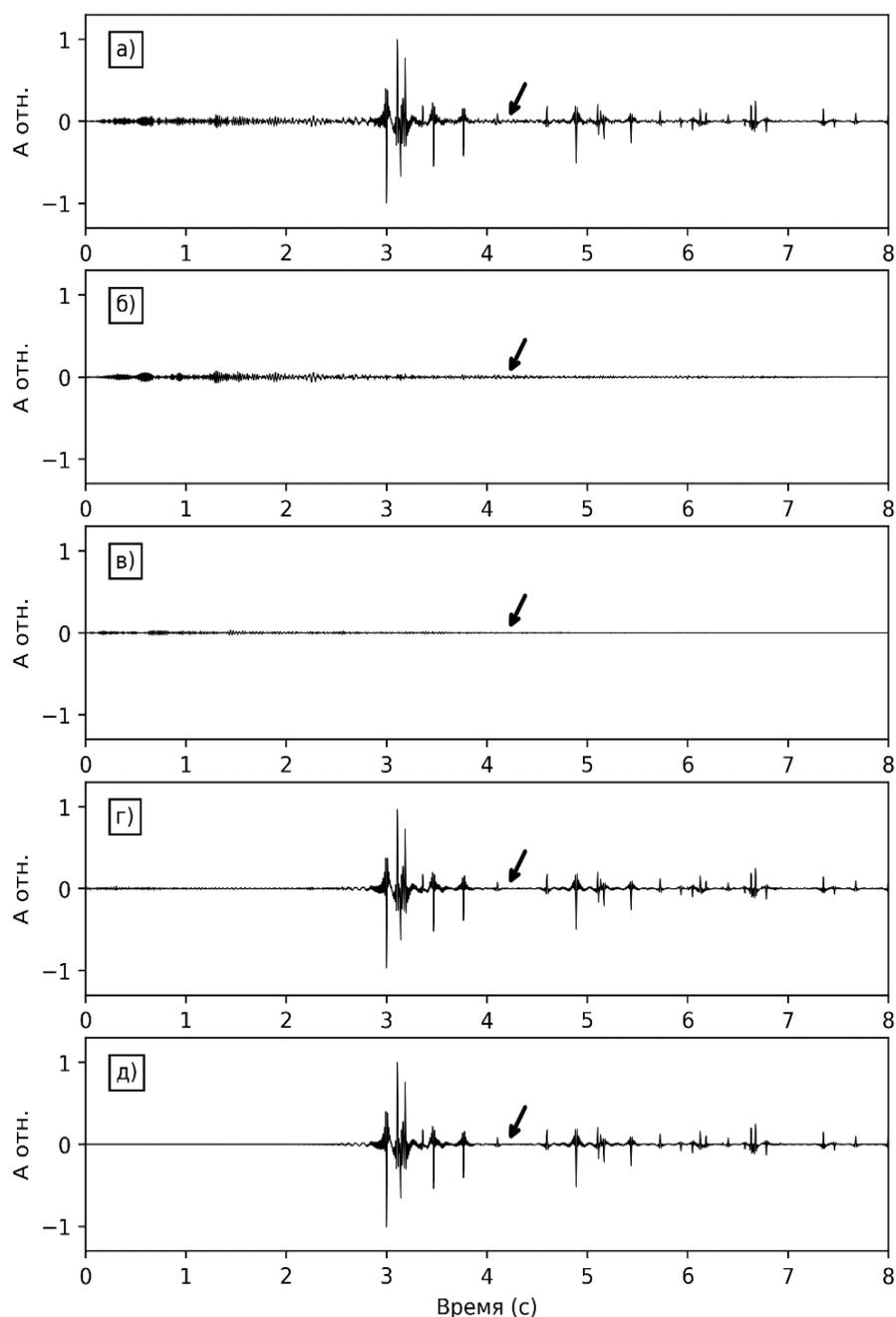


Рис. 1. Пример подавления шума на синтетической трассе: а – исходная коррелограмма, б – модель шумов второй гармоники, в – модель шумов третьей гармоники, г – результат вычитания, д – желаемый результат, идеальная коррелограмма без гармоник

Традиционным способом анализа вибросейсмических записей является применение к трассам волнового поля преобразования Фурье в локальном скользящем окне, в результате чего получают графики спектрально-временного представления (СВП). Такие графики были посчитаны для всех показанных выше трасс и представлены соответственно на рис. 2, а, б, в, г и д. На СВП исходной коррелограммы выделяются отклики сфокусированных сигналов в виде вертикальных линий (выделены белым пунктиром), а также двух старших гармоник – наклонные линии (зеленый пунктир для второй гармоники и красный для третьей). Эти же наклонные линии наблюдаются на спрогнозированных моделях гармоник, а результат подавления помех их не содержит. Таким образом, помеха, с которой мы боролись, успешно устранена.

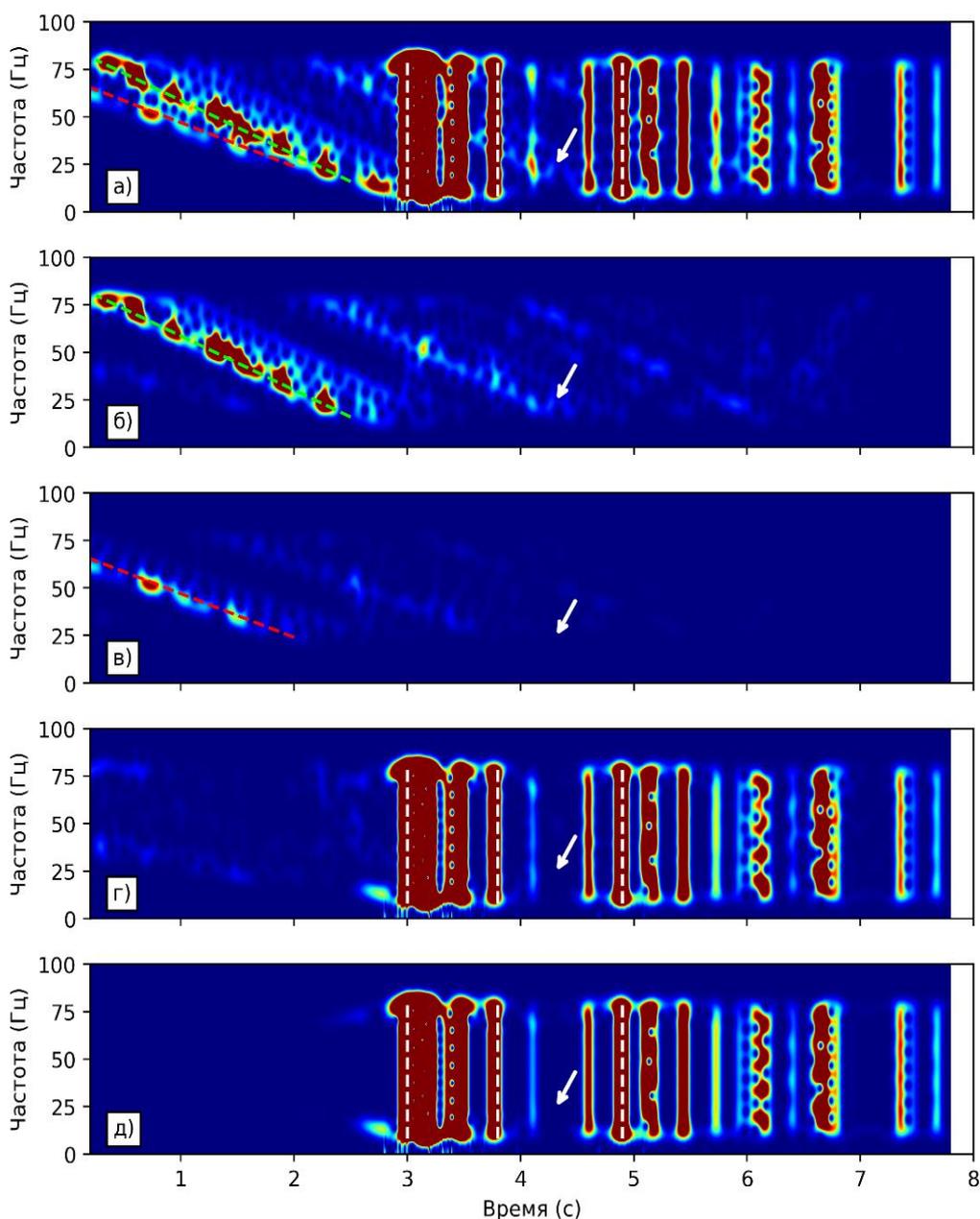


Рис. 2. СВП трасс, приведенных на рис. 1: а – исходная коррелограмма, б – модель шумов второй гармоники, в – модель шумов третьей гармоники, г – результат вычитания, д – модельная коррелограмма без гармоник

В некоторых случаях в процессе полевых работ регистрируется сигнал толкающего усилия плиты виброисточника. Записи толкающего усилия могут использоваться в предлагаемом алгоритме. В таком случае оценка фильтров $a_m(t)$ производится не по сейсмическим трассам, а по записям толкающего усилия. Этот подход будет обладать известными преимуществами, если в условиях проведения полевого эксперимента удастся записать достоверный сигнал, свободный от помех той или иной природы. Тогда использованный нами при получении описанных выше результатов метод статистического оценивания искомых параметров по трассе, рассматриваемой как реализация случайного процесса, будет заменен на аналогичный детерминированный алгоритм. Это обеспечивает возможность отказа от статистических гипотез, в том числе, от предположения о том, что последовательность коэффициентов отражения является белым шумом. Впрочем, наш алгоритм позволяет обрабатывать сейсмические трассы и без записей толкающего усилия, в чем мы уже имели возможность убедиться.

Эта же модельная коррелограмма была обработана с применением детерминированного алгоритма. Для настройки фильтров использовалась точная форма сигнала виброисточника. Полученный результат визуально не отличается от трассы на рис. 1, *г*, поэтому здесь не приводится.

ПОЛЕВЫЕ СЕЙСМОГРАММЫ

Выводы, сделанные на основании модельного примера, подтверждаются и по результатам обработки площадной полевой виброграммы, любезно предоставленной специалистами компании «Башнефтегеофизика» и показанной на рис. 3, *а*. Так как наиболее наглядно возможности предложенного нами алгоритма выявляются при обработке данных, полученных по технологии слип-свип, мы имитировали соответствующую протяженную виброграмму, состоящую из нескольких интерферирующих друг с другом записей от нескольких пунктов возбуждения. Виброграмма, представленная на рис. 3, *а*, получена в результате наложения одной исходной записи на другую с подвижкой 6 с при длине свип-сигнала 24 с. Для усиления исследуемых эффектов подвижка вводится в запись ближней к источнику косы, которая затем суммируется с записью дальней косы. На рис. 3, *б* и *в* приводятся графики СВП двух трасс (соответственно, малого и среднего удаления источник–приемник) на этой сейсмограмме. На них, помимо сигнала, выделяются старшие гармоники. Заметно, что амплитуды сигнала на записи дальней косы сравнимы с амплитудами гармоник на записи ближней косы, в которую была введена подвижка.

После корреляции с основным свипом имеем коррелограмму, показанную на рис. 4, *а*. На ней заметны шумы корреляции (показаны стрелками), расположенные выше первых вступлений и интерферирующие со слабыми полезными отражениями. Они же отображаются на СВП графике в виде наклонных линий (выделены пунктиром: красным для второй гармоники, зеленым для третьей и фиолетовым для четвертой) – рис. 4, *б* и *в*. На СВП невооруженным глазом можно выделить только гармоники 2-го и 3-го порядков, однако в процессе последующей обработки было замечено, что гармоника 4-го порядка также имеет существенную амплитуду на ближних к источнику каналах. На основании этого анализа принято решение о применении фильтра подавления гармоник 2-го, 3-го и 4-го порядков. Поэтому мы используем фильтр $d_{(14)}$ (т. е. при этом ограничимся одной итерацией прогнозирования помехи).

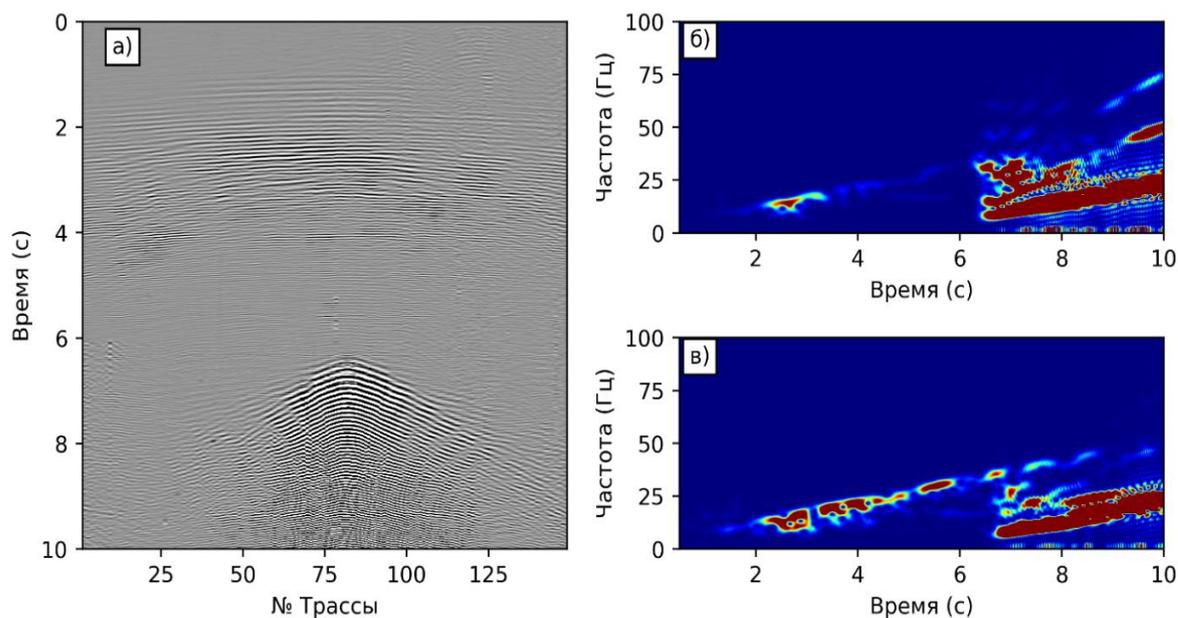


Рис. 3. Сечение исходной площадной виброграммы – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

Заметим, что энергия на СВП, не имеющая характерного наклона, является в данном случае сигналом. Так, практически вся энергия (за исключением гармоник) в диапазоне времен 0–2 с представляет собой результат СВП волн, возбужденных первым сработавшим источником, а высокоамплитудные события в диапазоне 6–7 с – СВП волн, возбужденных вторым источником (напомним, что в данном случае запаздывание срабатывания второго источника равно 6 с).

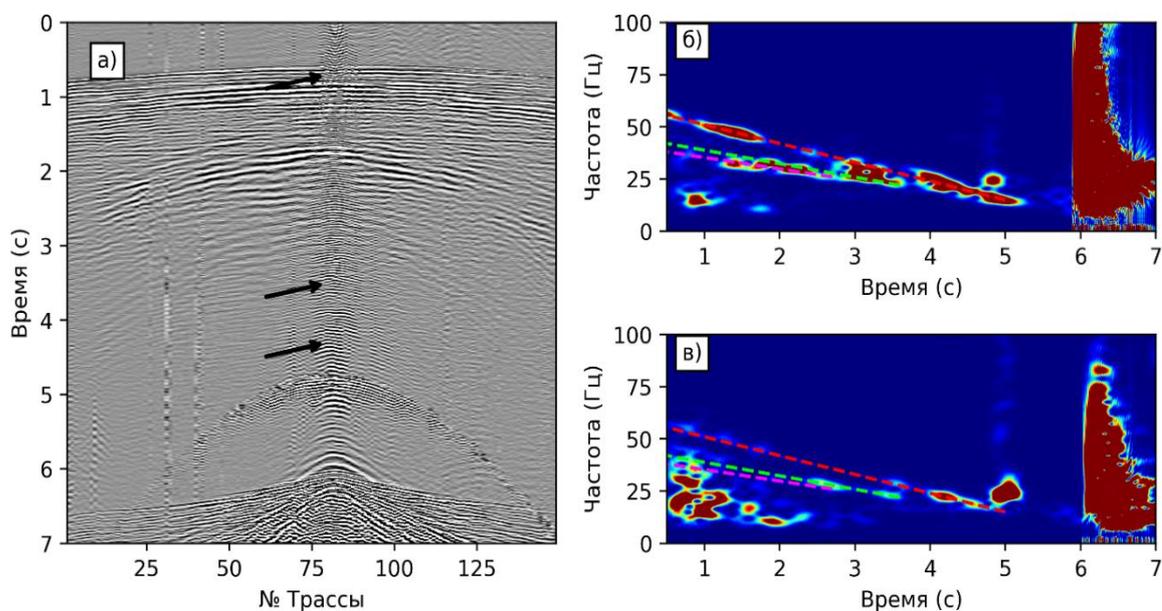


Рис. 4. Сечение исходной площадной коррелограммы, полученной в результате корреляции исходной виброграммы с основным свипом – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

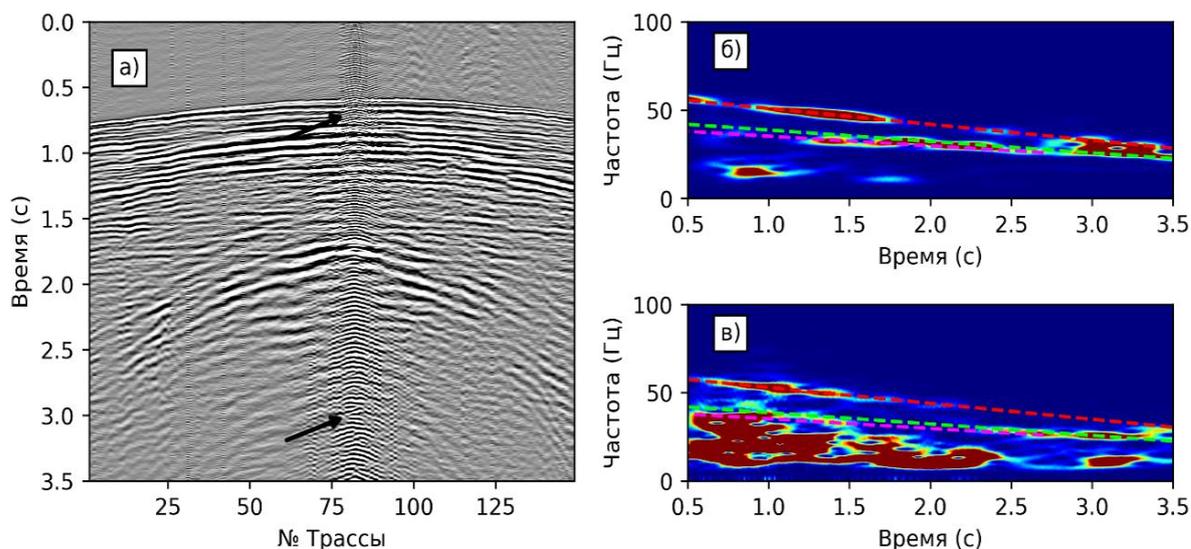


Рис. 5. Фрагмент сечения исходной коррелограммы – а и фрагменты СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

С целью более детального анализа волновой картины исходная коррелограмма представлена также в увеличенном масштабе. Показан фрагмент в области первых вступлений от предыдущего источника (рис. 5, а). Верхняя стрелка указывает на интенсивный гармонический шум, интерферирующий с сигналом и, более того, даже накладывающийся на запись от более раннего вибровоздействия.

То, что отмеченная стрелками помеха является именно гармоническим шумом, а не имеет иную природу, доказывает СВП на рис. 5, б и в. В самом деле, в статье [Денисов, Егоров, 2019б] было показано, что ФВК двух ЛЧМ-сигналов также представляет собой ЛЧМ-сигнал. Понятно, что на графике СВП такой сигнал выглядит как наклонная линия. Поэтому контролировать работу алгоритма подавления помехи будет удобно не только при помощи визуального контроля волновой картины, но и по СВП трасс. В идеальном результате подавления гармонических помех должны остаться все шумы, которые не описываются моделью гармоник, т. е. имеют иную природу. Алгоритм должен устранять только гармоники. Интерпретируя получаемые в процессе обработки трассы совместно с их СВП, будем следить за тем, чтобы на последних исчезали отмеченные пунктиром наклонные линии, и оставались любые другие характерные особенности.

Модель гармоник 2-го порядка показана на рис. 6, а, а СВП двух ее трасс – на рис. 6, б и в. Это же волновое поле в увеличенном масштабе и его СВП приведены на рис. 7. Очевидно, что удалось достаточно точно воспроизвести характер помехи, наблюдаемой на рис. 4, а. При этом, разумеется, потребуется применить адаптацию с целью учета частотно-зависимого характера отличия амплитуд спрогнозированной и реальной гармоник.

На модели помехи проявляется дополнительный ложный энергетический всплеск (показан белой стрелкой на рис. 6, б и 7, б), о природе которого мы рассуждали в предыдущих публикациях. Здесь же приведем лишь краткий комментарий, напомнив основные принципы формирования поля помех при прогнозировании. Коррелограмма z_1 содержит сфокусированный сигнал (импульс Клаудера) и помеху, являющуюся взаимной корреляцией основного свипа и свипа гармоники, которую мы обозначали как c_{21} .

Помеха прогнозируется в результате свертки z_1 с c_{21} , а точнее – в результате свертки c_{21} с импульсом Клаудера. Однако c_{21} действует также и на c_{21} , в результате чего получается дополнительный ложный энергетический всплеск, отсутствующий в исходной коррелограмме. Если этот своеобразный артефакт преобразования имеет значительную относительную амплитуду, он будет мешать адаптации. Устранить его можно, применив вторую итерацию прогнозирования с целью получения модели 2-го порядка, что, впрочем, опять породит аналогичный артефакт, но уже меньшей амплитуды и т. д. Такой эффект иллюстрирует особенности применения рекурсивной фильтрации в интересующей нас задаче. Если амплитуда помехи мала, то описанный процесс быстро сходится, и целесообразно, как мы и делаем, ограничиться одной или двумя его итерациями. Аналогичными свойствами обладают и спрогнозированные гармоники 3-го порядка, показанные на рис. 8 (в увеличенном масштабе – на рис. 9) и гармоники 4-го порядка, показанные на рис. 10 (в увеличенном масштабе – на рис. 11).

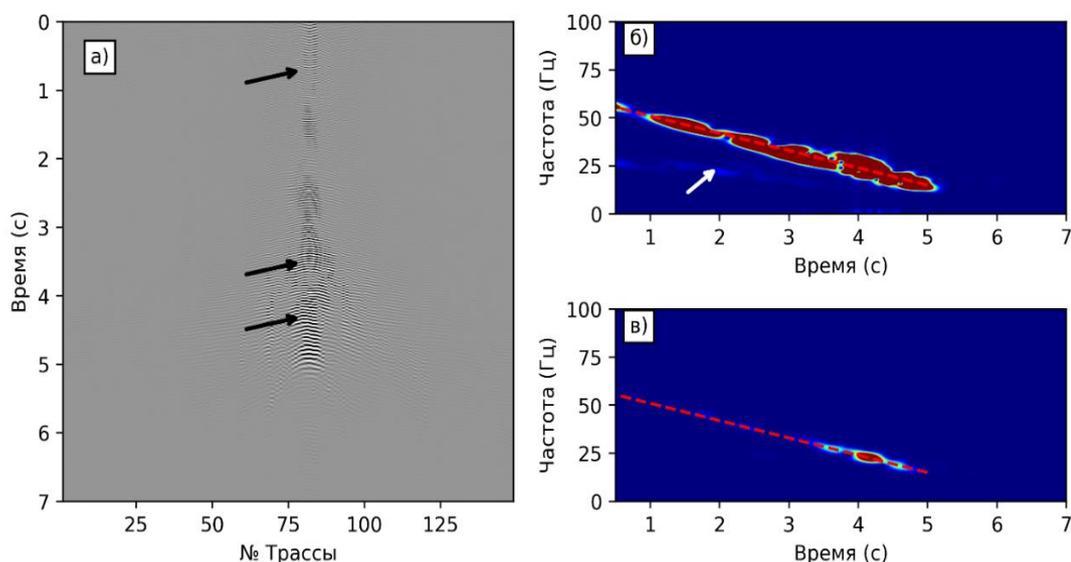


Рис. 6. Модель гармоники 2-го порядка – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

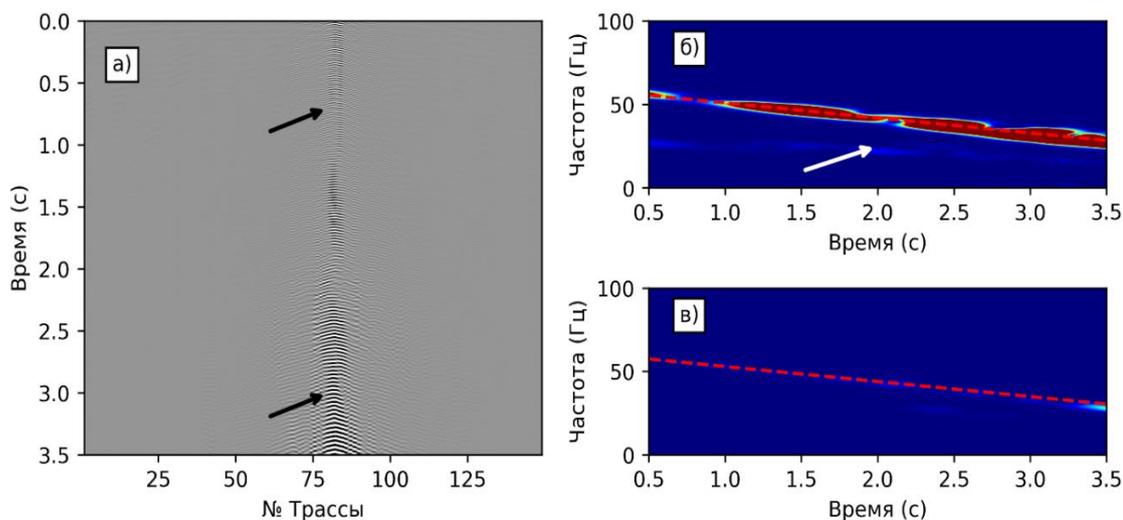


Рис. 7. Фрагмент модели гармоники 2-го порядка – а и фрагменты СВП двух трасс: б – малого (б) и в – среднего удаления источник–приемник

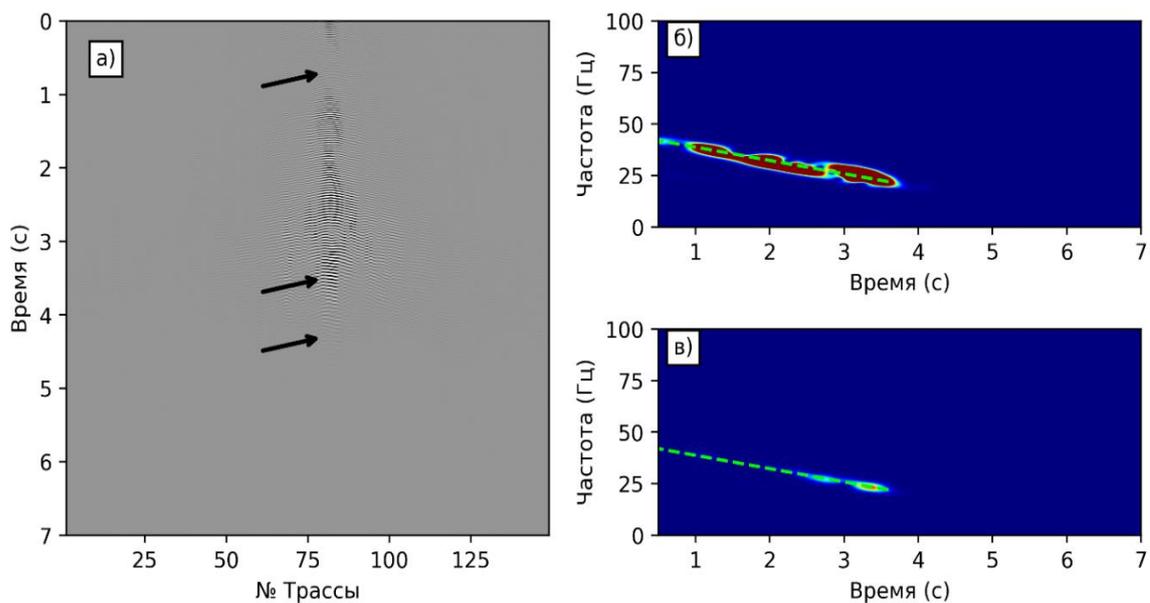


Рис. 8. Модель гармоники 3-го порядка – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

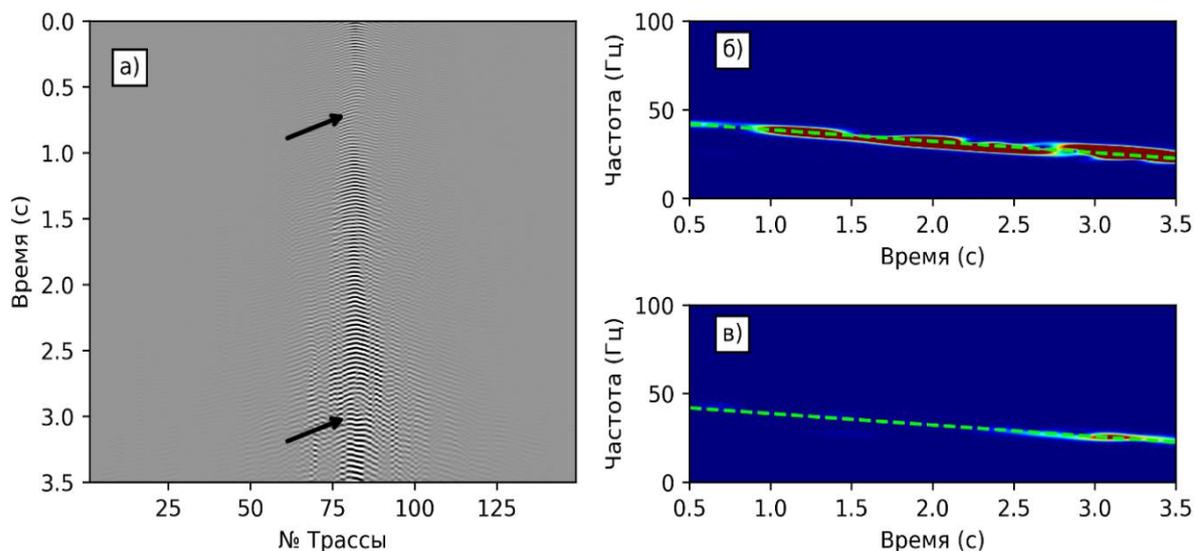


Рис. 9. Фрагмент модели гармоники 3-го порядка – а и фрагменты СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

В результате одновременного адаптивного вычитания трех моделей помех из исходной коррелограммы получаем сейсмограмму, представленную на рис. 12, а, а СВП – на рис. 12, б и в. Волновое поле в увеличенном масштабе и СВП приведены на рис. 13. Очевидно, что удалось значительно ослабить энергию гармоник. При этом сигнал не искажается. Кажется бы, волновое поле все еще содержит фон помех, которые мешают выделению сигнала в области интерференции. Корректно проинтерпретировать волновую картину помогает ее СВП, из сопоставления которого с рис. 4, б и в, а также с рис. 5, б и в следует, что наклонные линии, соответствующие 2-й и 3-й гармоникам, исчезли. Таким образом, оставшиеся шумы гармоническими искажениями не являются и имеют иную природу. Об этой природе мы можем только догадываться. Наш алгоритм их не устранил, что от него и требовалось.

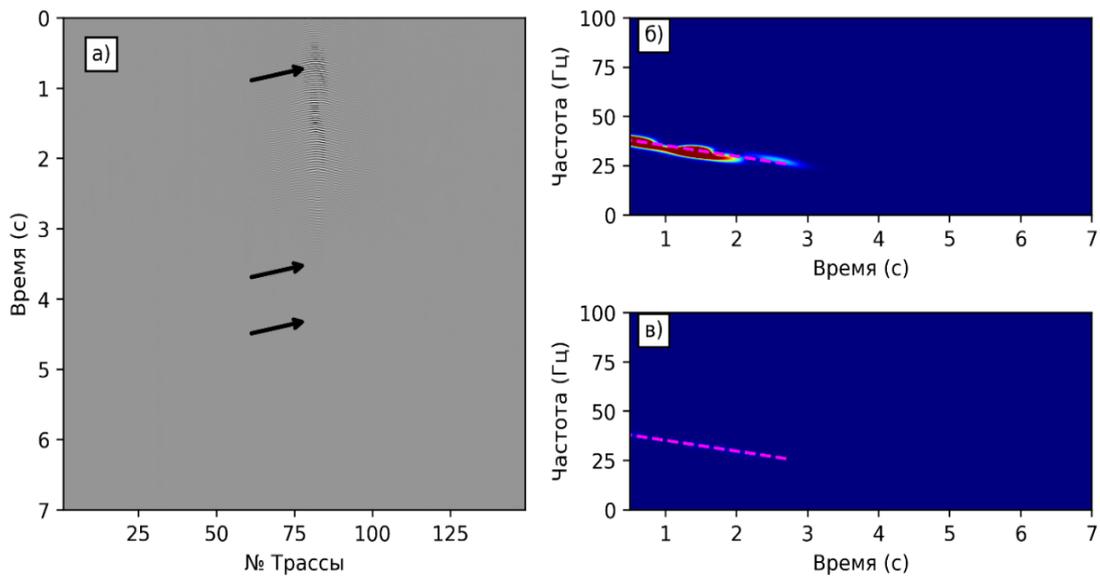


Рис. 10. Модель гармоники 4-го порядка – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

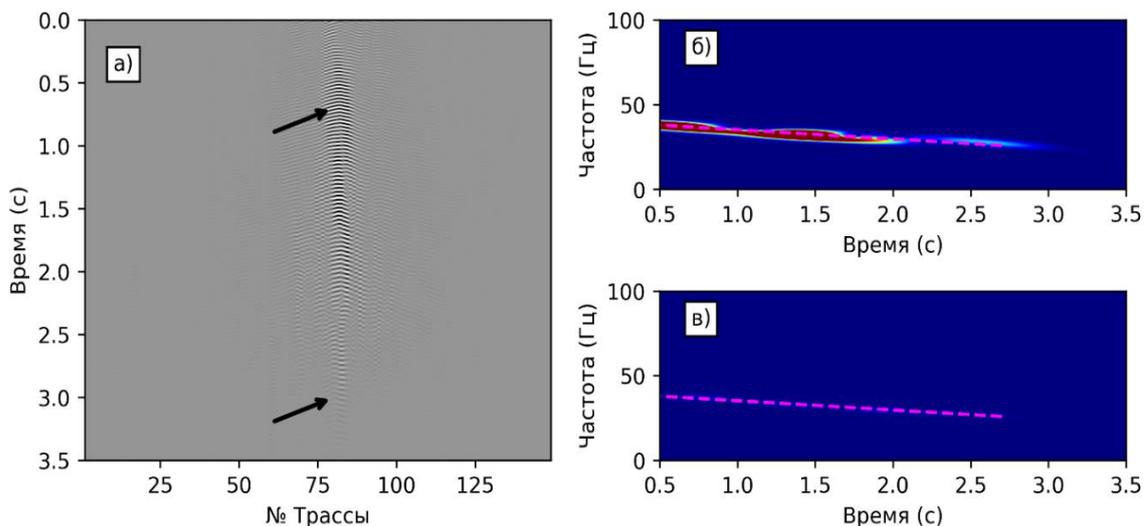


Рис. 11. Фрагмент модели гармоники 4-го порядка – а и фрагменты СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

Аналогичные расчеты были проведены с целью изучения целесообразности использования фильтра $d_{(24)}$. Его применение подразумевает предварительный расчет дополнительных моделей помех, о которых мы рассуждали выше. Для примера на рис. 14 показана модель 2-го порядка 2-й гармоники и ее СВП. Однако применение моделей более высоких порядков почти не изменяет результат вычитания помех, и дополнительные итерации мало влияют на качество работы процедуры. Поэтому соответствующие волновые картины здесь не приводятся. В данных условиях фильтр $d_{(14)}$ показывает хорошую работоспособность, и усложнение оператора нецелесообразно. Оно могло бы потребоваться, если бы гармоники были более интенсивными, что проявлялось бы в виде появления ложных энергетических всплесков на трассах, полученных в результате действия оператора $d_{(14)}$. Использование фильтра $d_{(24)}$ (или, в более общем случае, $d_{(K4)}$ при $K > 2$) ослабило бы эти артефакты.

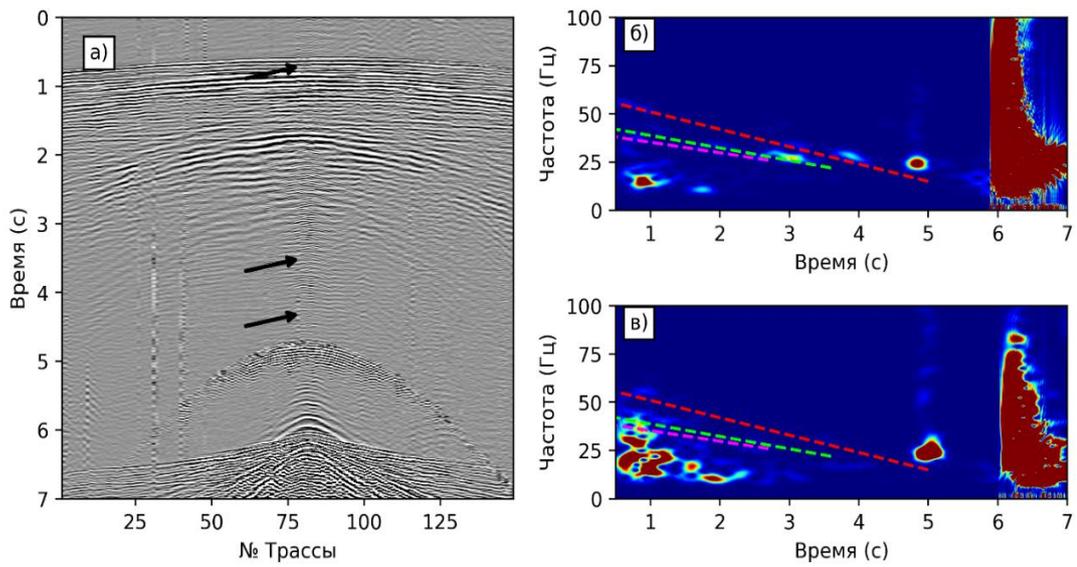


Рис. 12. Результат вычитания помех – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

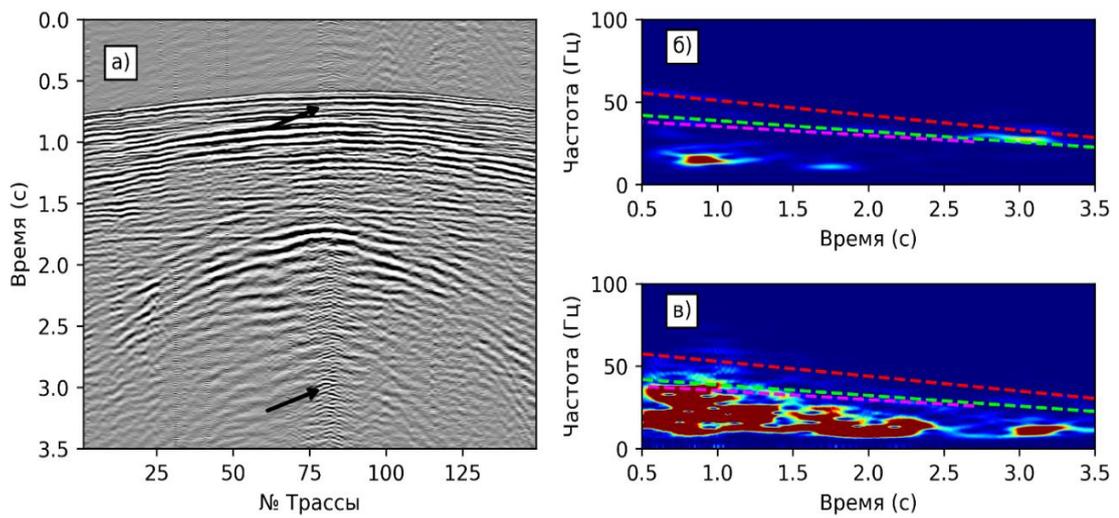


Рис. 13. Фрагмент коррелограммы после вычитания помех – а и фрагменты СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

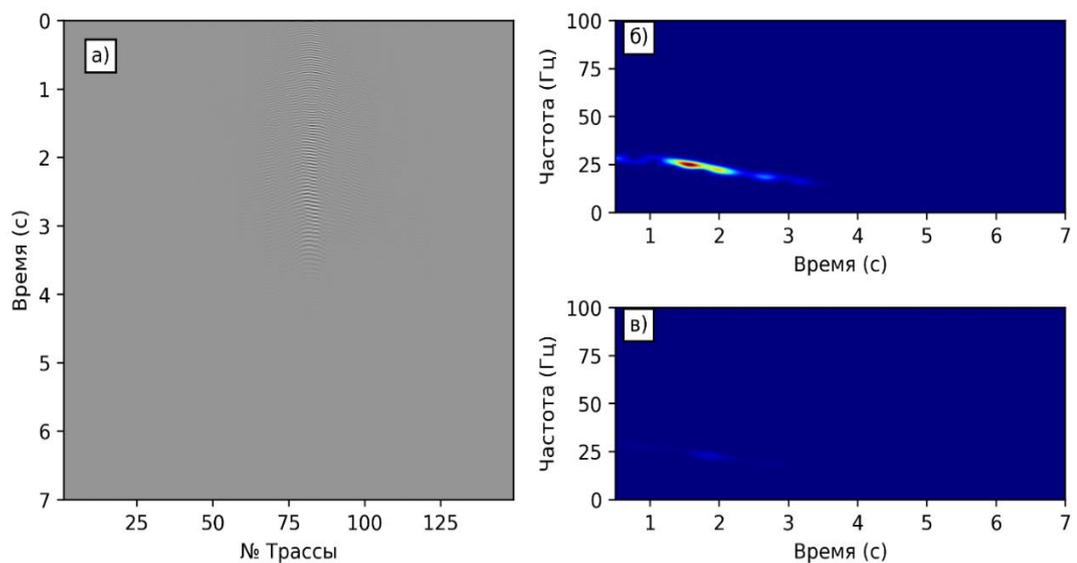


Рис. 14. Модель 2-ой гармоники 2-го порядка – а и СВП двух трасс: б – малого и в – среднего удаления источник–приемник

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В цикле статей, завершаемом настоящей работой, предложена математическая модель вибросейсмического импульса, осложненного гармониками. На ее основании разработан алгоритм удаления гармоник, реализуемый как обращение этой модели. В процессе обращения производится статистическое оценивание фильтров, описывающих эффект частотно-зависимого отличия амплитуд гармоник от порождающего их основного свипа. Оператор удаления гармонических искажений сигнала реализуется в виде рекурсивной схемы, которую удобно аппроксимировать конечным числом членов разложения в быстро сходящийся ряд.

Алгоритм подтвердил свою эффективность в процессе опробования на модельных и полевых данных. Мы рекомендуем его к применению для обработки материалов, полученных как по способу слип-сви́п, так и по классической схеме возбуждения и регистрации. Нами приведены методические рекомендации по его использованию.

В качестве направления дальнейших исследований мы выбрали изучение возможностей разработанных алгоритмов в задаче использования гармоник для расширения спектра сигнала, планируя осветить результаты наших работ в отдельной публикации.

Авторы благодарят И.Р. Ягудина и Р.М. Гафарова («Башнефтегеофизика») за предоставленные полевые виброграммы и разрешение на их демонстрацию.

ЛИТЕРАТУРА

Денисов М.С., Егоров А.А. Построение модели вибросейсмического сигнала, осложненного гармониками // Геофизические технологии. – 2019а. – № 1. – С. 72–83.

Денисов М.С., Егоров А.А. Оптимизационная рекурсивная фильтрация как способ подавления гармоник в методе вибросейс // Геофизические технологии. – 2019б. – № 2. – С. 23–53.

Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. – М.: Недра, 2000. – 100 с.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДЕНИСОВ Михаил Сергеевич – доктор физико-математических наук, директор по науке ООО «ГЕОЛАБ». Научные интересы: разработка алгоритмов обработки данных сейсморазведки.

ЕГОРОВ Антон Алексеевич – геофизик ООО «ГЕОЛАБ». Научные интересы: разработка алгоритмов обработки данных сейсморазведки, полное обращение волновых полей, e-mail: anton21egorov@gmail.com.

ШНЕЕРСОН Михаил Борисович – доктор технических наук, профессор РГУ нефти и газа, e-mail: shneer@bk.ru.