

УДК 550.834.05

Разработка и обоснование камеральной методики подавления вторичных гармоник в технологии высокопроизводительной вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep

■ Кибальчич А.С., Крайнова А.К., Коробкин В.С., ООО "СЖЖ Восток", г. Москва.

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема ухудшения качества сейсмических материалов при использовании технологии вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep. Предложен новый камеральный способ подавления гармонических искажений, основанный на расчете мгновенных частот помех, контролируемой декорреляции и совместной многопараметрической адаптивной фильтрации в частотно-временной области на уровне виброграмм.

Ключевые слова: вибрационная сейсморазведка, Slip-Sweep, вторичные гармоники, нелинейные искажения, адаптивное вычитание.

Введение

Современный этап геологоразведочных работ (ГРП) в сложных климатических условиях арктических и северных регионов России характеризуется жесткими требованиями к сокращению циклов полевых работ и оптимизации их стоимости. Внедрение технологии Slip-Sweep позволило за ограниченные временные сроки полевых сезонов отработать обширные площади с использованием высокоплотных систем наблюдения. Это привело к оперативному получению геолого-геофизической информации для проектирования ключевых инфраструктурных объектов.

Однако широкое применение Slip-Sweep сопряжено со специфическими ограничениями волнового поля. Одним из них является регистрация интенсивных вторичных гармоник, причем основная проблема заключается не в самом их наличии, а в том, что вторичные гармоники, генерируемые последующим источником, накладываются непосредственно на полезный сигнал текущего источника и искажают его. Возникающие гармонические искажения существенно усложняют динамическую интерпретацию сейсмических данных и снижают потенциал метода при решении прикладных геологических задач.

Целью настоящей работы является разработка, теоретическое обоснование и апробация алгоритма, обеспечивающего

эффективное подавление энергии вторичных гармоник без искажения полезного сигнала.

Физическая природа и характер проявления гармонических искажений в данных Slip-Sweep

Методика Slip-Sweep – это высокопроизводительный метод полевой сейсморазведки, основанный на использовании перекрывающихся вибрационных свип-сигналов. Вибровозбуждения на разных ПВ выполняются с определенной задержкой по времени (slip-time), поэтому одновременно работающие вибраторы излучают упругие колебания на разных частотных диапазонах. Теоретически, за счет того, что в каждый дискретный момент времени частоты работающих источников различаются, их сигналы не интерферируют между собой. Это должно обеспечивать их полную независимость и корректное разделение при последующей корреляции виброграмм с соответствующими пилотными свип-сигналами.

Однако на практике в системе «вибратор-грунт» всегда возникают сильные нелинейные искажения. Они связаны с неоднородностью грунта и техническими особенностями самой вибрационной установки. Данные искажения наиболее интенсивны на низких частотах и приводят к генерации вторичных гармоник, частоты

которых кратны основной частоте опорного сигнала. Так, при генерации свипа в диапазоне 2-40 Гц частотный диапазон второй гармоники составит уже 4-80 Гц, третьей – 6-120 Гц, а четвертой – 8-160 Гц.

При работе одиночного источника его собственные высшие гармоники не создают проблем: после корреляции они смещаются в область отрицательных времен и не учитываются при дальнейшей обработке. Однако в условиях Slip-Sweep ситуация меняется: методы, направленные на подавление собственных гармоник одиночного источника, здесь бессильны, так как природа помехи становится принципиально иной. Главная проблема Slip-Sweep – это взаимное наложение волновых полей: вторичные гармоники от последующего ПВ накладываются на фундаментальный сигнал текущего ПВ прямо во время полевой регистрации. В результате на конкретных временах и частотах траектории этих помех пересекаются с полезными отражениями, искажая запись.

На сейсмических данных эта проблема проявляется в двух формах:

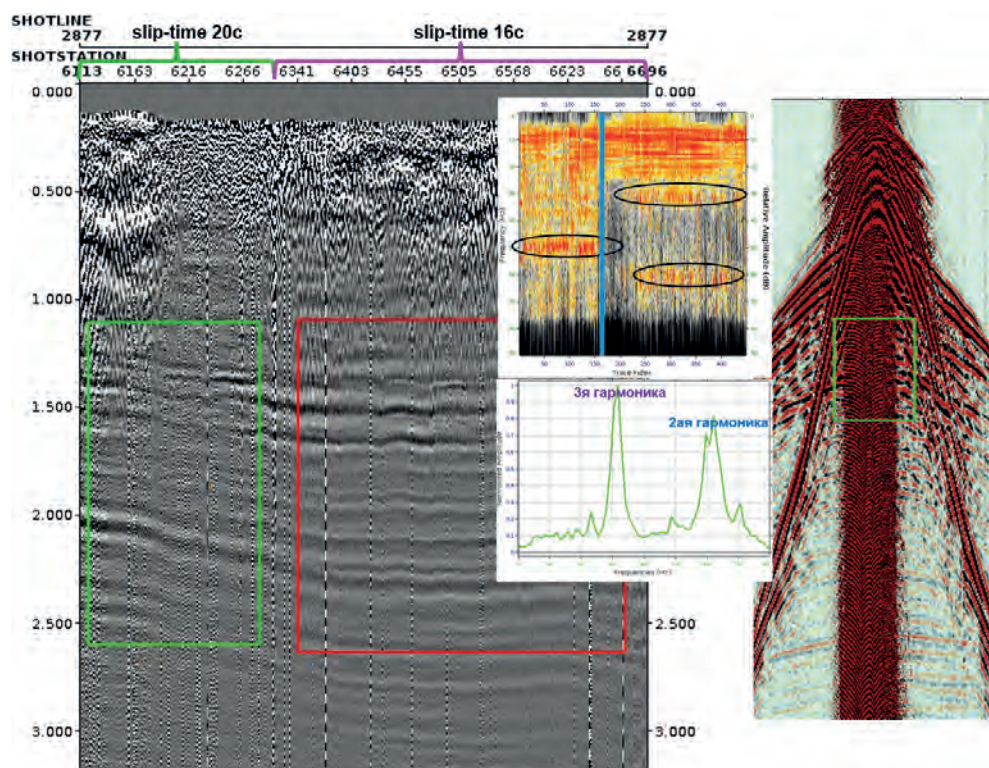
На уровне сырых данных: наблюдаются локальные всплески амплитуд на опре-

деленных частотах целевого интервала (в нашем случае, наиболее часто в районах 30, 40 и 50 Гц). Они локализуются преимущественно на ближних удалениях и вносят вклад в формирование так называемого амплитудного «столба». Важно отметить, что природа этого «столба» на ближних удалениях носит комплексный характер. Это не просто следствие работы метода Slip-Sweep, а результат интерференции самых разных типов волн. В этой зоне перекрываются мощные поверхностные волны (Рэля, Лява, ground-roll), техногенные шумы самой вибрационной установки, а также продольные и поперечные компоненты, вызванные эффектом направленности источника. Вторичные гармоники от последующих свипов накладываются на этот фон, становясь ключевым деструктивным фактором для полезной записи (рис. 1).

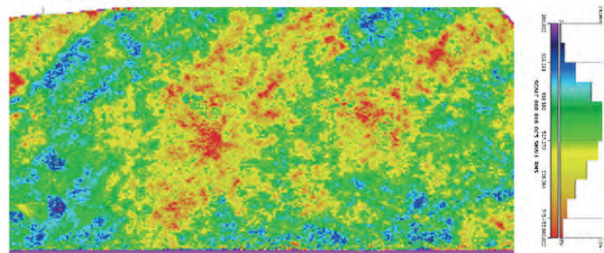
На этапе обработки: после различных этапов обработки остаточная энергия интерферирующих гармоник транслируется в яркую линейную «полосчатость» амплитудного поля в целевых окнах (особенно выраженную в полосах 16–32 и 32–64 Гц). Эта аномальная «полосча

► Рис. 1.

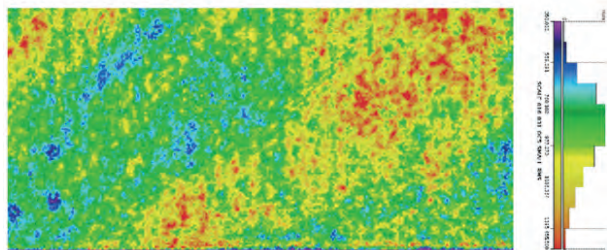
Проявление гармонических искажений на сырых данных.



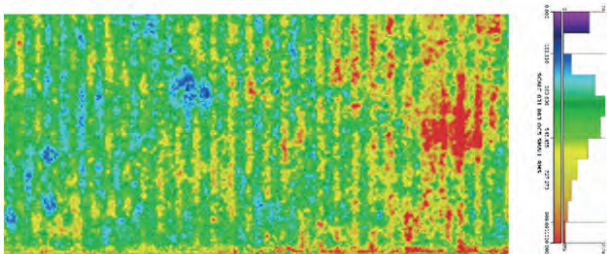
Частоты 8-16 Гц



Частоты 16-32 Гц

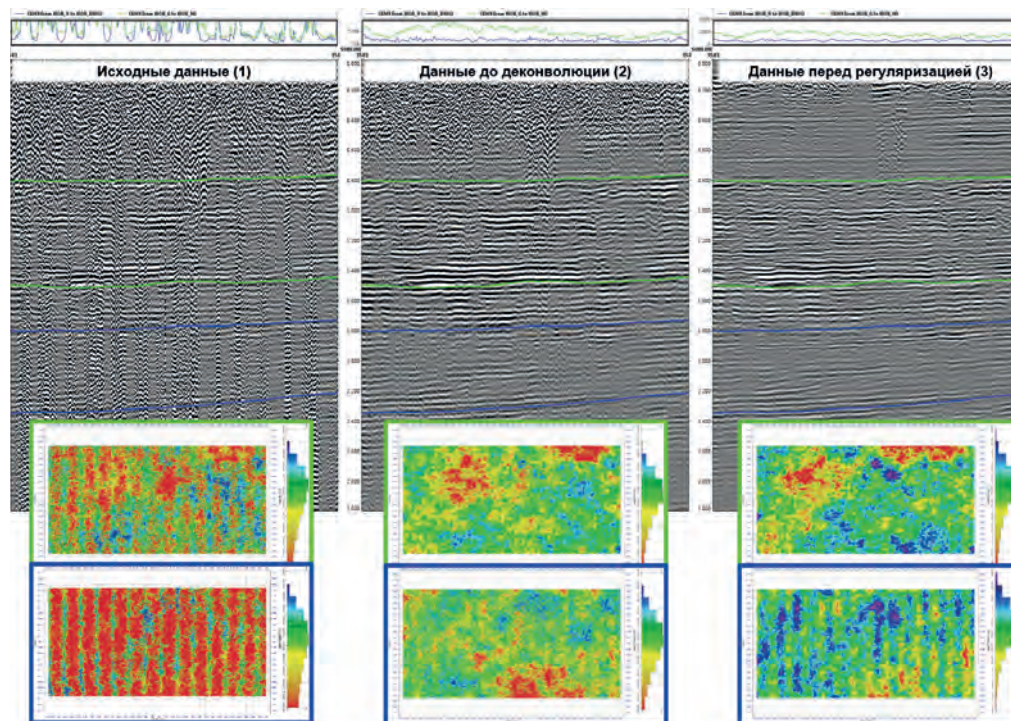


Частоты 32-64 Гц



▲ Рис. 2. Проявление гармонических искажений после различных этапов обработки на картах RMS-амплитуд.

тость» коррелирует латерально с пространственной схемой проходки вибрационных групп по площади (рис. 2).



◀ Рис. 3. Недостаточная эффективность стандартного графа обработки для подавления вторичных гармоник

Ограниченность стандартных подходов к шумоподавлению

Применение стандартных процедур шумоподавления для борьбы с вторичными гармониками демонстрирует низкую эффективность. На ранних этапах обработки энергия регулярного фона помех визуально нивелируется, и карты RMS-амплитуд кажутся однородными. Однако по мере прохождения графа обработки становится очевидным, что влияние вторичных гармоник не было компенсировано, и негативные эффекты проявляются повторно. При этом характер проявления гармоник инвертируется, преобразуясь из областей повышенных амплитуд в выраженные зоны пониженных амплитуд. Это искажает динамическую особенность волнового поля, снижая достоверность последующих результатов интерпретации (рис. 3).

Теоретико-математические основы предлагаемого камерального метода

Для преодоления ограничений существующих процедур авторами разработан способ целенаправленного моделирования и адаптивного вычитания помех, не требующий привлечения сиг-

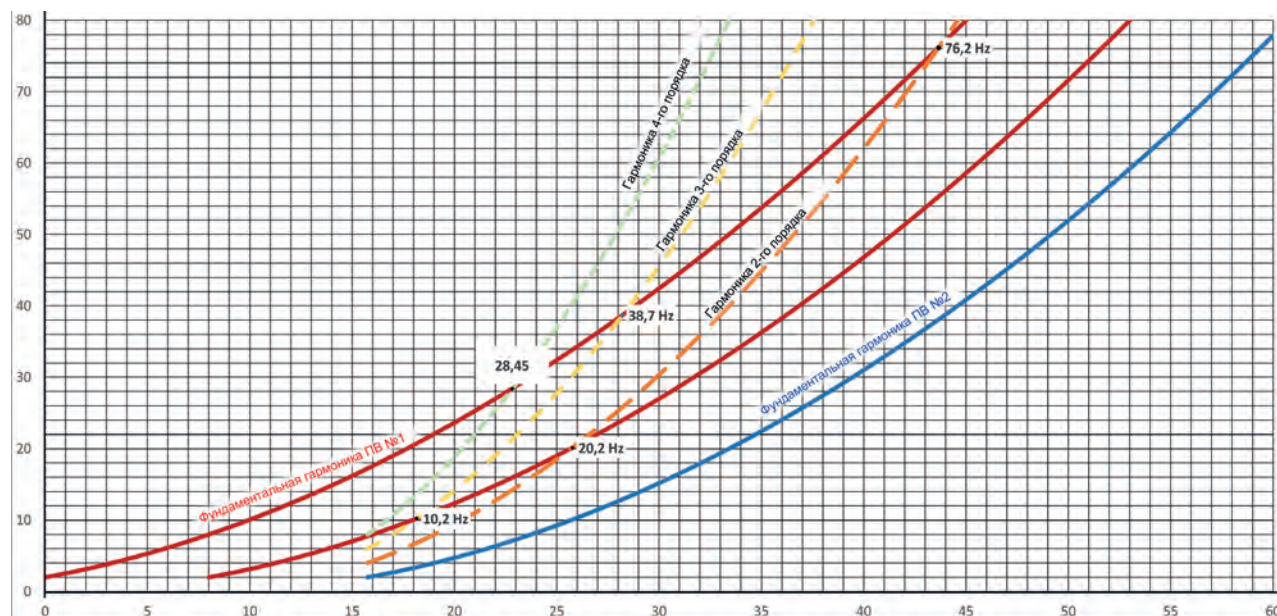
налов Ground Force и реализуемый полностью на вычислительных мощностях обрабатывающего комплекса g2. Метод включает три последовательных этапа.

Этап 1. Аналитическое параметрическое моделирование траекторий гармоник: в исходных данных известны тип свип-сигнала, диапазон рабочих частот, длительность развертки, а также геометрия расстановки и точные временные задержки между соседними ПВ (slip-time). Этого набора параметров достаточно, чтобы однозначно восстановить, как ведёт себя во времени частота не только основного свипа, но и кратных гармоник любого порядка от следующего ПВ в любой точке наблюдения. Для каждого ПВ строятся частотно-временные развертки фундаментальной компоненты и вторичных гармоник с учётом известных задержек между возбуждениями. Это позволяет задать детерминированные траектории пересечения гармоник последующих источников с фундаментальным сигналом текущего источника на уровне виброграмм (рис. 4). Формально положение гармонических помех в целевом временном интервале может быть задано двумя эквивалентными способами.

В аналитическом варианте задают-

ся законы частотной развертки обоих свип-сигналов и решается система уравнений, описывающая моменты их взаимного пересечения в начале и в конце окна анализа. Полученные граничные точки (время и частота совпадения гармоник) далее используются для построения корреляционных траекторий на коррелограмме и расчёта мгновенной частоты модели шума. В операционном варианте те же траектории восстанавливаются непосредственно из корреляционных соотношений: выполняется корреляция пилотного свип-сигнала и синтетического сигнала гармоник N-го порядка, что даёт частотно-временную развертку модели помехи. Таким образом, параметры свипа и схема возбуждений позволяют как аналитически, так и через корреляционные операторы однозначно задать положение гармонических помех сначала на виброграмме, а затем корректно перенести эту информацию в область коррелограмм. Далее эти траектории последовательно переносятся в область коррелограмм с помощью корреляции. В результате формируется многомерная кинематическая матрица, где для гармоники каждого порядка заданы точные границы и положение

▼ Рис. 4. Графическое представление вторичных гармоник для Slip-time 16с в области виброграмм.



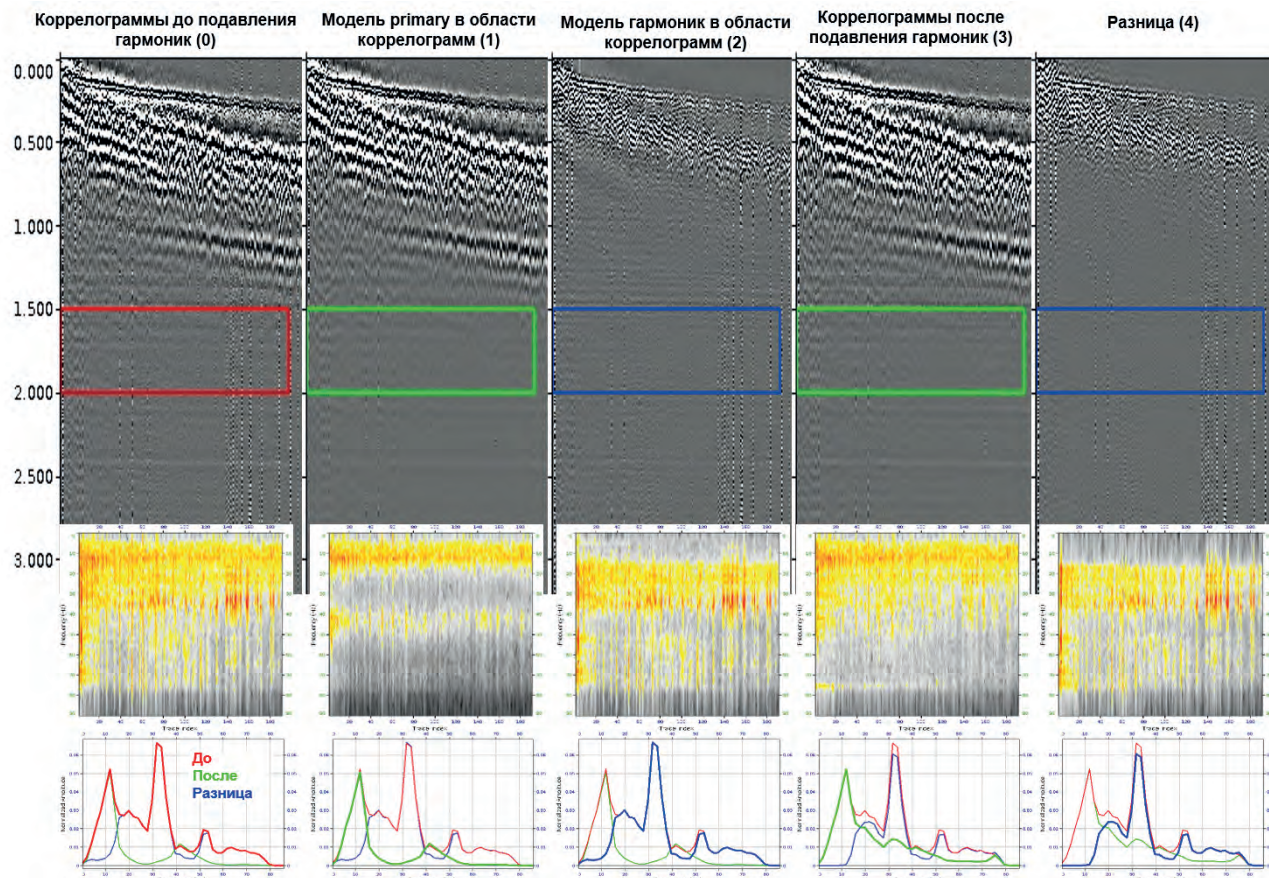
гармонических помех в плоскости «время-номер трассы» коррелограмм. Такие матрицы используются как бинарные маски при переходе в частотную область: в спектральном представлении данных обнуляются именно те зоны, где, согласно расчёту, должна проявляться энергия соответствующей вторичной гармоник.

Этап 2. Перевод данных из области коррелограмм в область виброграмм: прямое спектральное вычитание рассчитанной модели помехи непосредственно из коррелограммы возможно, но имеет явный недостаток: в зонах частотного наложения полезного сигнала и шума прямое вычитание неизбежно приводит к «утечке» сигнала. Для сохранения полезной компоненты целесообразно использовать комбинированный подход, включающий адаптивные и частотно-временные методы обработки. Для минимизации утечек и восстановления полезного сигнала предлагается выполнять адаптивное вычитание модели гармоник на уровне виброграмм. Применение виброграмм обосновано тем, что они представляют собой естественную частотно-временную развертку сигнала, позволяющую локализовать энергетические выбросы гармонических составляющих как по трассе, так и по времени, а также редактировать модели с учётом условий полевой регистрации, включая ограничения по длительности свип-сигнала и slip-time. Перевод данных из области коррелограмм (КГ) обратно в область виброграмм (ВГ) реализуется посредством процедуры декорреляции (деконволюция по пилотному свипу с отрицательной фазой). Безопасность и математическая обратимость данной процедуры подтверждена сквозным тестом (КГ-ВГ-КГ), продемонстрировавшим околонулевую разницу амплитудных спектров и полную сохранность волнового поля. Отдельно рассмотрен случай восстановления виброграммы из усеченной коррелограммы.

Несмотря на наличие ограничений по длине, анализ спектральных характеристик, полученных в различных временных окнах, показывает, что гармонические компоненты, попадающие в зону корреляции, сохраняются и могут быть эффективно разделены в области виброграмм.

Этап 3. Совместная адаптация моделей вторичных гармоник и модели сигнала: на данном этапе используются результаты предыдущих шагов. В области коррелограмм формируются исходные модели гармоник различных порядков с применением фильтрации по матрицам (компонента «модель гармоник»). Эти модели согласованы с положением помех, определённым на этапе параметрического моделирования. Параллельно формируется модель полезного сигнала, свободная от гармонических искажений и определяемая как арифметическая разность исходных данных и модели гармоник. Далее, в соответствии с процедурой этапа 2, модель гармоник, модель сигнала и исходные данные переводятся в область виброграмм посредством декорреляции. При этом сохраняется согласование с частотно-временными траекториями, что обеспечивает корректную локализацию помех. В области виброграмм выполняется совместная адаптация трёх компонент: исходных данных, модели гармоник и модели сигнала. Такой подход позволяет стабилизировать оценку амплитуд гармоник, минимизировать утечку полезного сигнала в модель гармоник и учесть условия полевой регистрации (длительность свип-сигнала, slip-time).

В результате формируется адаптированная модель гармонических искажений, согласованная с аналитически рассчитанными траекториями и не содержащая полезного сигнала. Полученная модель гармоник может быть вычтена как на уровне виброграмм, так и после



▲ Рис. 5. Результаты применения методики на уровне коррелограмм на реальных данных.

обратного перехода в область коррелограмм, что обеспечивает гибкость применения методики и согласованность результатов обработки.

Результаты применения методики на реальных данных

Разработанная методика прошла апробацию на шести лицензионных участках. Контроль качества выполнялся на различных стадиях обработки и включал анализ коррелограмм, сейсмограмм ОПВ, разрезов ближних удалений, карт среднеквадратических амплитуд и итоговых AVO-атрибутов.

В области коррелограмм после применения методики фиксируется устранение проявлений гармонических искажений, что подтверждается сопоставлением частотных характеристик. На сейсмограммах ОПВ в разностном поле преимущественно выделяются гармоники высших порядков, что свидетельствует о корректном подавлении помех при сохране-

нии полезного сигнала (рис. 5).

Сопоставление разрезов ближних удалений и карт среднеквадратических амплитуд, рассчитанных в целевом интервале, показывает снижение уровня артефактов после подавления (рис. 6). На финальных AVO-атрибутах без применения методики на картах интерсепта, градиента и флюид-фактора наблюдается «полосчатость», тогда как после применения методики этот эффект компенсируется, что приводит к повышению качества итоговых материалов и увеличивает их информативность для последующей интерпретации (рис. 7).

Заключение

Системный анализ ограничений высокопроизводительной вибрационной сейсморазведки Slip-Sweep показал, что ключевой причиной деградации динамических параметров записи является интерференция полезного сигнала со вторичными гармониками высших по-

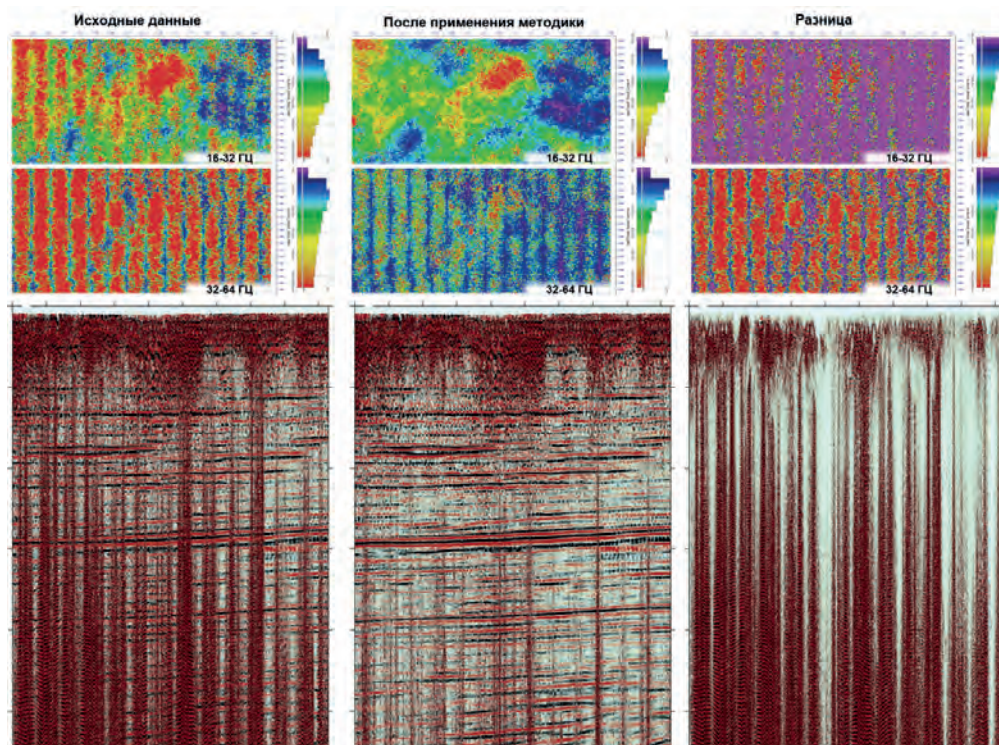


Рис. 6. Результаты применения методики на разрезах ближних удалений и картах RMS-амплитуд.

рядков с соседних пунктов возбуждения. Стандартные процедуры шумоподавления обладают эффектом маскировки,

скрывая регулярную помеху на ранних этапах графа обработки и транслируя искажения в амплитудные атрибуты («по-

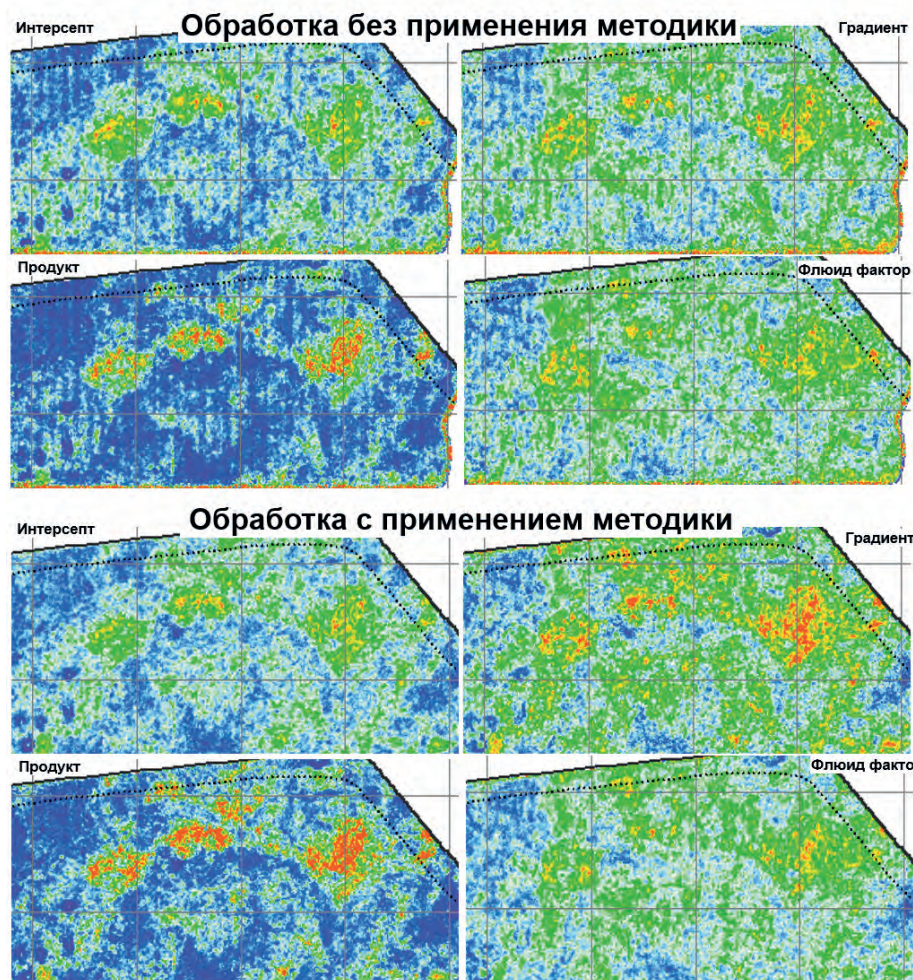


Рис. 7. Сравнение карт AVO-атрибутов, полученных по данным без подавления вторичных гармоник и после применения предложенной методики.

лосчатость» карт RMS-амплитуд и AVO-атрибутов), что снижает достоверность динамической интерпретации.

В работе предложен камеральный метод целенаправленного подавления энергии вторичных гармоник, не требующий использования сигналов Ground Force и полностью реализуемый в области обработки. Разработанная методика параметрического моделирования траекторий гармоник, декорреляции и многомасштабной адаптации в области виброграмм обеспечивает удаление вторичных гармоник при сохранении полезного сигнала.

Показано, что алгоритм позволяет формировать адаптированную модель гармонических искажений, согласованную с теоретически рассчитанными траекториями и не содержащую полезной компоненты.

Результаты производственного внедрения с разными параметрами свип-сигналов подтвердили инвариантность алгоритма и существенное повышение достоверности финальных материалов.

Предлагаемая методика не имеет ограничений по параметрам свип-сигналов, качеству полевых данных, универсальна и может свободно применяться для любого материала, полученного по технологии Slip-Sweep. Это позволяет расширить область практического применения Slip-Sweep и повысить общую экономическую эффективность геолого-разведочных проектов в сложных условиях высокоплотных систем наблюдения.

Литература

1. Денисов М. С., Зыков А. А. Повышение разрешающей способности вибросейсмического сигнала за счет использования гармоник // Геология и геолого-разведочные работы. – 2019. – № 1. – С. 72–83.

2. Денисов М. С., Зыков А. А. Разделение сигнала и гармоник в невзрывной сейсморазведке с амплитудно- и нелинейно-частотно-модулированными сигналами // Геофизические технологии. – 2023. – № 3. – С. 69–83. – DOI: <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2023-3-69>.

3. Долгих Ю. Н. Оценка нелинейных искажений при вибрационной сейсморазведке // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 2. – С. 45–54.

4. Долгих Ю. Н., Гуляев Д. В., Соколовский В. В., Кузнецов В. И. Обработка виброграмм как способ повышения качества результатов высокопроизводительной вибросейсморазведки // Георесурсы. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 27–32. – DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.4>.

5. Чернышов Г. С., Литвиченко Д. А., Стеклёнов В. В., Дучков А. А. Анализ эффективности методов подавления помех вибрационных данных // Геофизические технологии. – 2024. – № 3. – С. 17–25. – DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-17-25>.