

Применение комбинации нескольких частотно модулированных свип-сигналов Qwell, адаптированных для конкретных геологических условий, для снижения уровня нелинейных искажений, увеличения временного и динамического разрешения записи

■ Адиев Т.Р., Жужель А.С., АО «Башнефтегеофизика», г. Уфа.

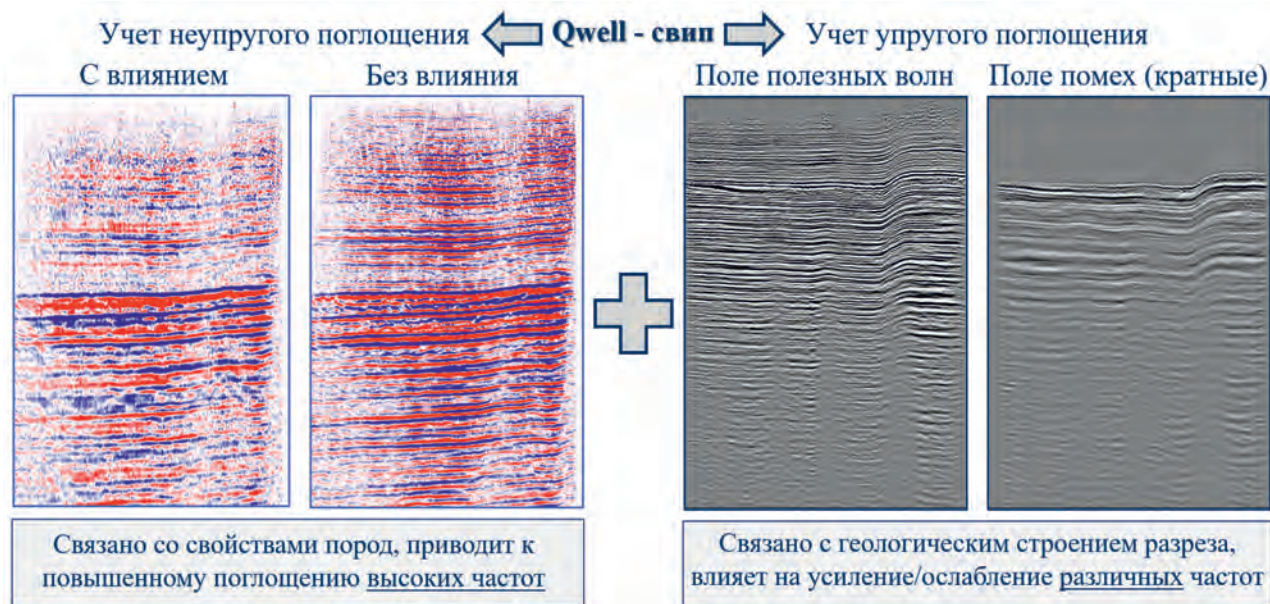
Аннотация: В статье рассмотрены достижения в области производственных сейсморазведочных работ 2D, выполненных с учетом геологических условий посредством адаптации высокочастотного свип-сигнала под интересующий диапазон глубин на основе анализа сейсмических данных. Впервые была применена запатентованная технология, уменьшающая влияние гармонических искажений и побочных максимумов корреляционной функции при работе с нелинейными свип-сигналами, что позволило снизить уровень соответствующих помех примерно на треть. Важно отметить, что данные результаты были достигнуты без привлечения дополнительных ресурсов и без снижения производительности труда, в то же время у обработанных данных на этапе деконволюции проявляется значительный прирост высокочастотной компоненты в целевых интервалах при одновременном сохранении высокого качества низкочастотной информации. Данный факт выгодно отличает полученные материалы от результатов применения традиционного линейного свип-сигнала и подтверждает перспективность более широкого применения современных вибрационных технологий при проведении полевых сейсморазведочных работ.

Введение

На территории исследуемого участка в Республике Калмыкия поверхностные условия и геологическое строение разреза способствовали эффективному использованию наземных вибрационных источников сейсмических колебаний. При относительно неглубоком залегании перспективных горизонтов (до 2 с) это позволило получить данные с соотношением амплитуд сигнал/шум более 25 у.е. Вместе с тем, центральная частота отраженных волн, используемая как критерий качества, не превышала 40 Гц, несмотря на широкую полосу частот линейного свип-сигнала от 3 до 140 Гц. В подобных условиях высокую эффективность демонстрирует технология, учитывающая частотно-зависимое (неупругое) поглощение непосредственно на этапе формирования свип-сигнала, что позво-

ляет повысить разрешающую способность записи за счет перераспределения избыточной энергии низких частот в область быстро затухающих высоких [Адиев, Коротков, 2023; Korotkov, Zhukov, 2020].

В данном регионе значительное влияние на частотный состав сейсмической записи также оказывает упругое рассеяние на акустически контрастных слоях, обусловленное образованием интенсивных внутренних кратных переотражений, интерферирующих с сигналом проходящей волны и изменяющих его амплитудный спектр (часть частот усиливается, часть ослабляется). Единственным на данный момент времени способом учета данного эффекта непосредственно в ходе производственных работ является анализ изменений, связанных с упругим рассеиванием,



▲ Рис. 1. Учитываемые параметры среды в свип-сигнале Qwell.

выявляемых в сигнале по данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП) [Жуков и др., 2023] или наземной сейсморазведки, с последующей компенсации искажающего влияния в амплитудном и фазовом спектре свип-сигнала.

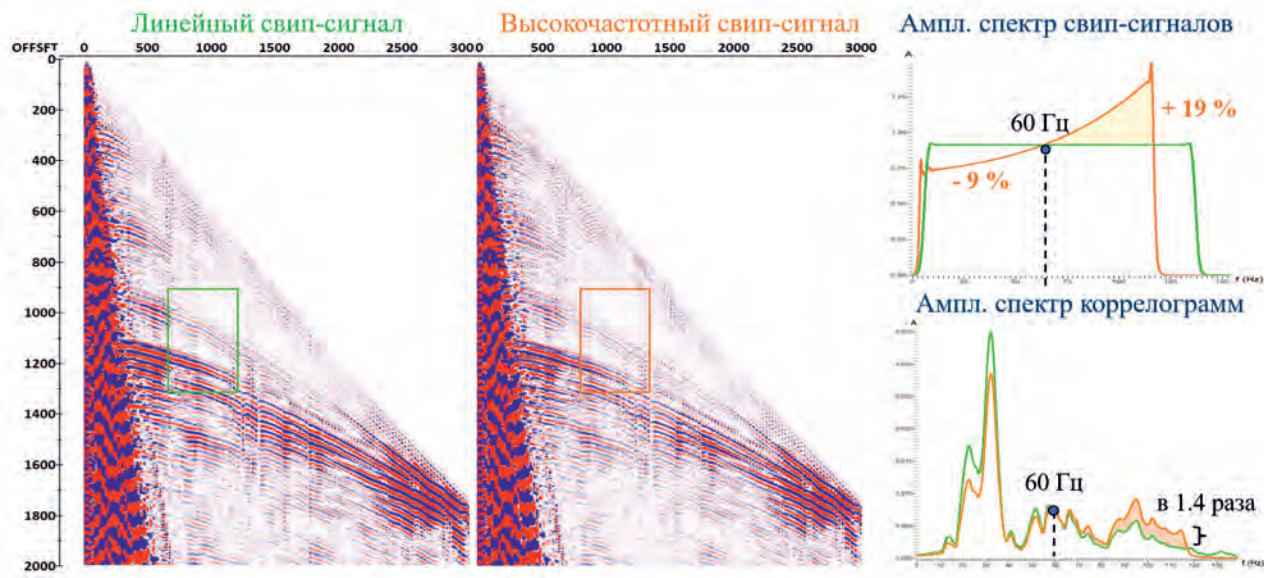
Подбор оптимальных параметров компенсации неупругого поглощения

При использовании стандартного линейного свип-сигнала с шириной спектра от 3 до 140 Гц, на частотах выше 120 Гц не наблюдалось существенного количества полезной информации на полевых коррелограммах, поэтому верхняя граница частот перебираемых нелинейных свип-сигналов была ограничена этим значением. Степень компенсации последующего поглощения высоких частот в свип-сигнале выбиралась на основе оценки общей энергии отражений и визуального анализа полевых сейсмограмм на наличие осей синфазности отражений выделяющихся на фоне помех после применения частотных фильтров. Был выбран умеренный режим балансирования: энергия низких и средних частот (до 60 Гц) была снижена

всего на 9%, при росте общей энергии высоких частот (от 60 до 120 Гц) на 19%. Такой подход позволил минимизировать риски потери полезной информации на низких частотах, одновременно обеспечив значительный рост вплоть до 1.4 раза амплитуды высокочастотных компонент отражений (рис. 2). Для достижения аналогичного эффекта с линейным свип-сигналом длительность последнего пришлось бы увеличить до 34 секунд вместо принятых в производстве 24 секунд, что снизило бы производительность работ примерно на треть с учетом 6-секундного времени прослушивания.

Подбор параметров компенсации неупругого поглощения

Для оценки и учета неупругого поглощения исследовались полевые сейсмограммы наземной сейсморазведки в окнах целевых горизонтов на наличие частотных интервалов с просадкой амплитуды, не согласующихся с теорией частотно-зависимого поглощения. Так как в пределах исследуемой площади отсутствуют качественные данные ВСП, такой подход дал более точную оценку влияния геологического строения среды



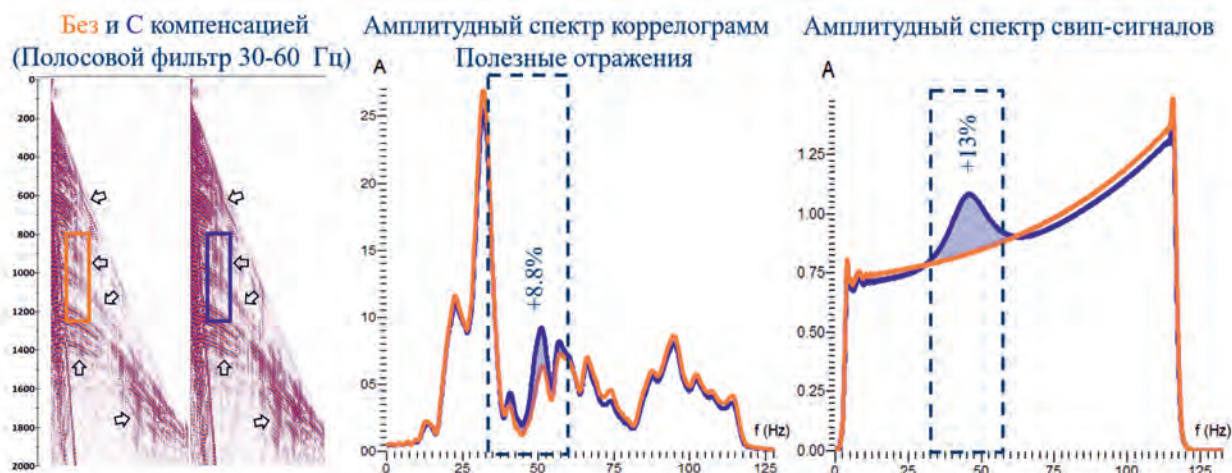
▲ Рис. 2. Усиление высокочастотной части спектра наблюдаемой записи.

и поверхностных условий на частотный состав записи. Для этих целей скважинные оценки влияние рассматривают в основном поле падающих волн в определенном интервале глубин, а сигнал при наземных сейсморазведочных работах испытывает влияние всей толщи дважды: при распространении до интересующего горизонта и после отражения по пути до земной поверхности. При исследованиях ВСП прибор прижат к стенкам скважины и имеет совершенно иные условия приема (в том числе зависящие от наличия и качества цементирования) нежели геофон при поверхностных исследованиях. Возникают помехи, связанные с резонансными колебаниями

прибора на контакте с исследуемой средой [Шехтман, 2021]. Перечисленные факторы негативно влияют на точность дальнейшей компенсации искажающих факторов в сигнале.

Для проверки эффективности компенсации неупругого поглощения был протестирован ранее выбранный нелинейный высокочастотный свип-сигнал с небольшими изменениями — увеличенным уровнем энергии (+13%) в диапазоне частот от 30 до 60 Гц (рис. 3), в котором амплитуда полезных отражений значительно ослабевает (рис.2). Общий прирост энергии отражений в данном частотном интервале составил около 9 %, при этом на отдельных частотах амплитуда

▼ Рис. 3. Компенсация провалов в амплитудном спектре сейсмической записи.



отражений повысилась на треть. Полностью компенсировать провал в спектре не удалось, что, вероятно, связано с увеличением энергии и влияния кратных волн, пропорционально росту энергии полезной волны. Тем не менее стремление к более прямоугольной форме амплитудного спектра отклика оправдано, поскольку это положительно отражается на качестве последующей обработки и интерпретации: при неравномерном спектре отдельные частоты оказываются подавлены или, наоборот, усилены, что приводит к искажению формы волны и смазанности границ слоёв. В ходе AVO-анализа нерегулярный спектр может стать причиной ошибок и ложных аномалий. Это также влияет на качество инверсии, фильтрации, атрибутивного анализа и ряда других процедур.

При компенсации неупругого воздействия среды, для выравнивания формы спектра, нецелесообразно снижать энергию свип-сигнала в диапазонах частот, где наблюдается аномально высокое значение амплитуды полезных отражений (например, в диапазоне 80–100 Гц на рис. 3), поскольку такое увеличение обусловлено наложением волн помех на полезный сигнал. При последующей обработке эти помехи будут удалены из волнового поля, и искусственное превышение амплитуд исчезнет. Поэтому, если изначально при генерации свип-сигнала уменьшить уровень энергии в этом частотном диапазоне, в данных может возникнуть провал амплитуд. С такой проблемой можно столкнуться при использовании свип-сигналов, полученных непосредственно из обратных фильтров амплитудных спектров полезных отражений. В нашем случае перераспределение энергии спектра было выполнено осознанно и направлено на компенсацию наиболее

выраженного и устойчивого по площади провала амплитуд в частотной области.

Комбинирование нескольких частотно-модулированных свип-сигналов

При компрессии длительного отклика свип-сигнала в узкий импульс за счет применения операции корреляции к полевым виброграммам, на коррелограмме также возникают побочные максимумы – корреляционные шумы, поведение и амплитуда которых зависит от параметров свип-сигнала [Жуков, Колесов др., 2011]. Для стандартного линейного свип-сигнала это ширина спектра ΔF и средняя частота F_{cp} , изменяя эти значения для двух и более сигналов возможно подобрать такую ситуацию, когда их корреляционные шумы будут ослаблять друг друга при сложении. Это явление легло в основу использования комбинированных сигналов для уменьшения корреляционных шумов ЛЧМ-сигналов [Edelmann, 1982]. Однако, в производственном режиме мы не можем позволить себе значительно изменять ширину частотного диапазона со стороны низких частот, одно только изменение начальной частоты на 6 Гц для свип-сигнала с частотой от 2 до 128 Гц, уменьшает октавность с 6 до 4 единиц, что влечет уменьшение динамического разрешения записи на 33 %.

При отходе от линейной формы частотной развертки амплитудный спектр сигнала становится неравномерным. Это приводит к увеличению побочных максимумов автокорреляционной функции, что заметно усиливает корреляционные шумы. Также существенно возрастает уровень нелинейных искажений в случае перераспределения энергии в сторону низких частот, это связано с тем, что даже самые современные вибрационные источники имеют конструктивные огра-

ничения и сложности при их генерации. Таким образом на поведение корреляционных шумов дополнительно начинают влиять параметры нелинейности, значения которых также отвечают за распределение по времени нелинейных искажения [Ягудин и др., 2022]. Этот факт позволяет суммировать нелинейные и корреляционные помехи коррелограмм полученных различными подобранными свип-сигналами деструктивно. Данный подход заложен в запатентованной методике, в которой предлагается уменьшать уровень корреляционных шумов и нелинейных искажений, увеличивающихся при отходе от прямоугольного амплитудного спектра сигнала за счет генерации и суммирования коррелограмм, полученных от нескольких свип-сигналов, отличающихся параметрами частотной развертки. Последовательность процедур является следующей:

1. Выбирается желаемая форма амплитудного спектра.

2. На его основе строятся два и более сигналов, каждый из которых имеет индивидуальную скорость нарастания частоты от времени и частотный интервал этого нарастания. Суммарный нормированный амплитудный спектр таких сигналов должен быть равным спектру

изначального свип-сигнала.

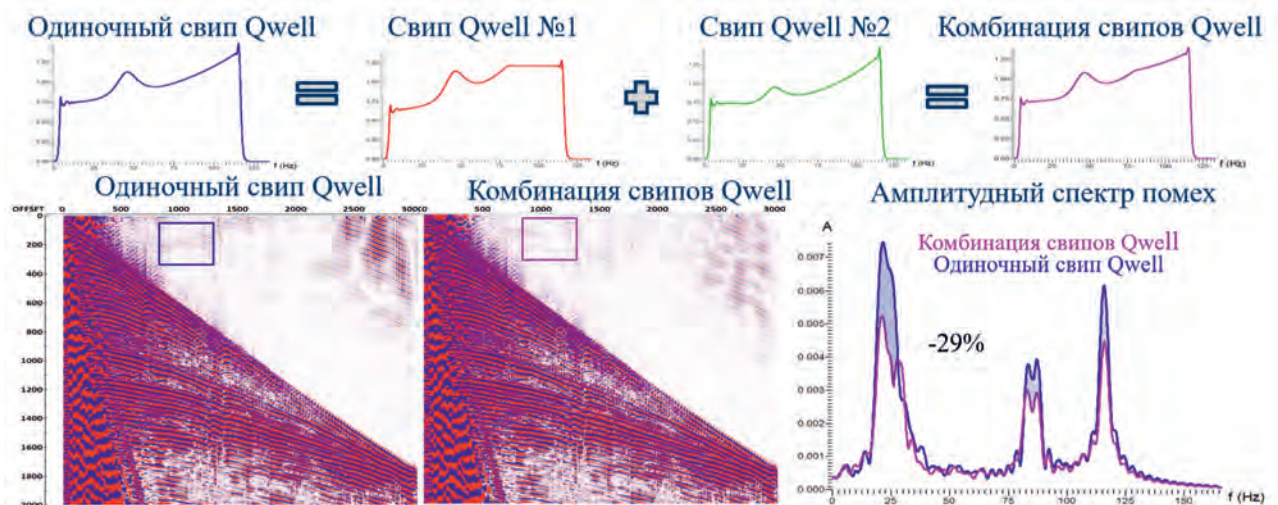
3. В случае работы с накоплениями, новые сигналы чередуются на одном пункте возбуждения. При работе высокопроизводительными методиками, чередование происходит от одного физического наблюдения к другому.

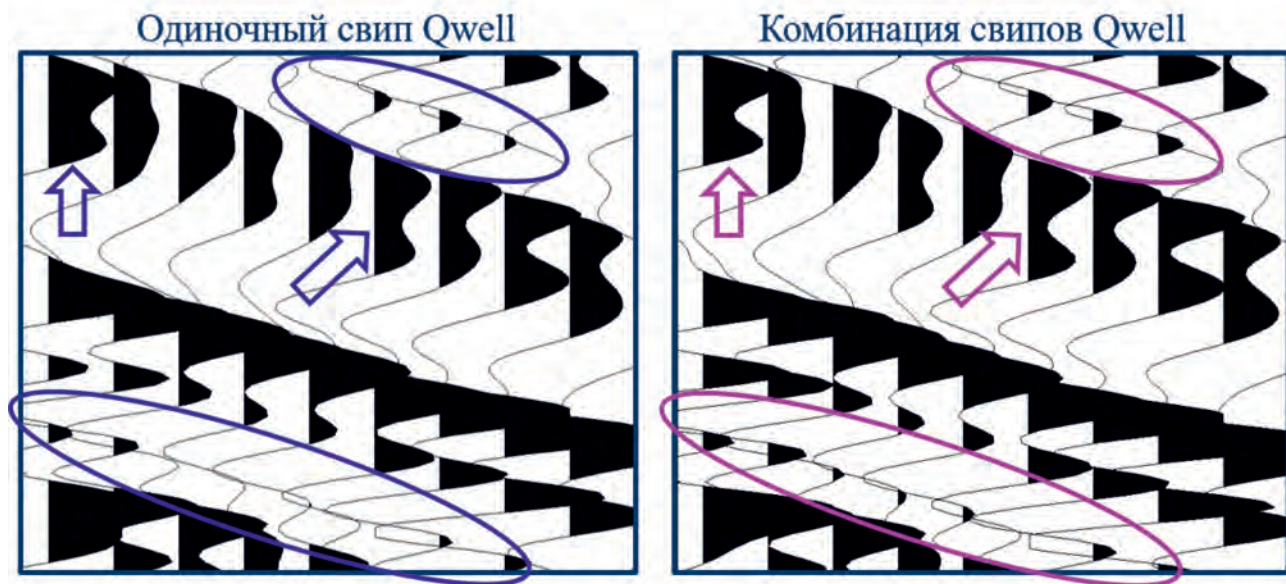
4. Зарегистрированные виброграммы коррелируются с теми свип-сигналами, на основе которых они были получены.

5. В случае работы с накоплениями суммирование коррелограмм для подавления помех происходит для одного общего пункта возбуждения. При работе высокопроизводительными методиками подавление происходит при суммировании трасс общей глубинной точки.

На исследуемой площади работы проводились по методике flip-floor двумя группами вибрационных источников с количеством накоплений 2 или 4, в зависимости от погодных условий. Благодаря использованию комбинации нелинейных свип-сигналов удалось снизить уровень помех, связанных с нелинейными искажениями и корреляционными шумами, на 29 % (рис.4). Это способствовало улучшению динамического разрешения записи (рис.5), и привело к росту соотношения амплитуд полез-

▼ Рис. 4. Эффект от комбинирования нескольких нелинейных свип-сигналов.





▲ Рис. 5. Повышение динамического разрешения полезных отражений.

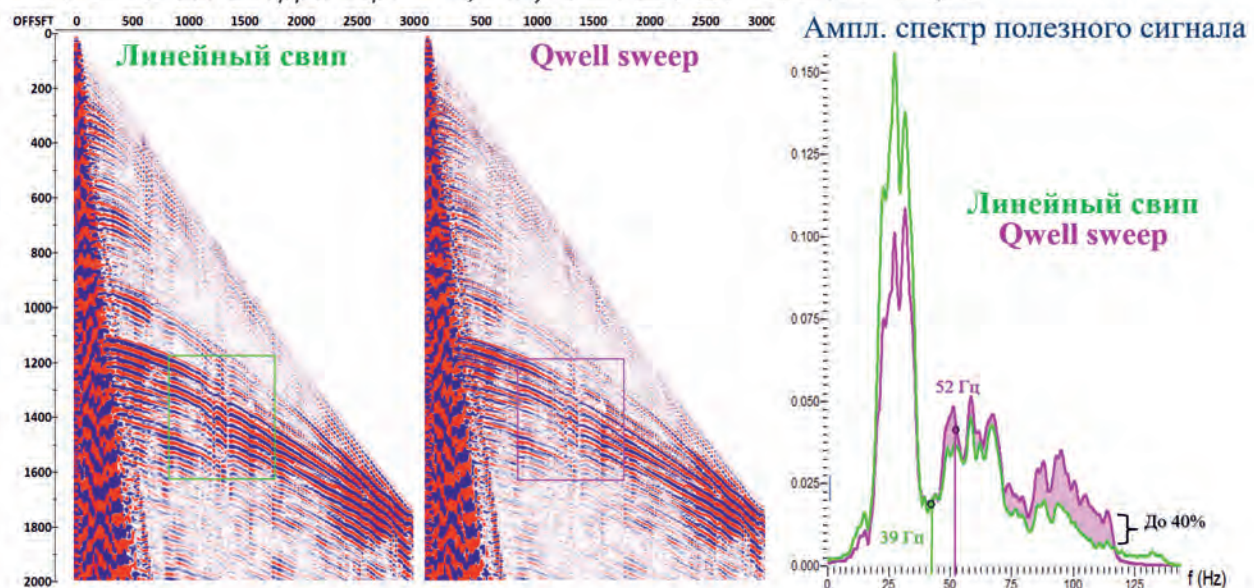
ных отражений к помехе в окнах, принятых в производстве, с 24 у.е. до 29 у.е.

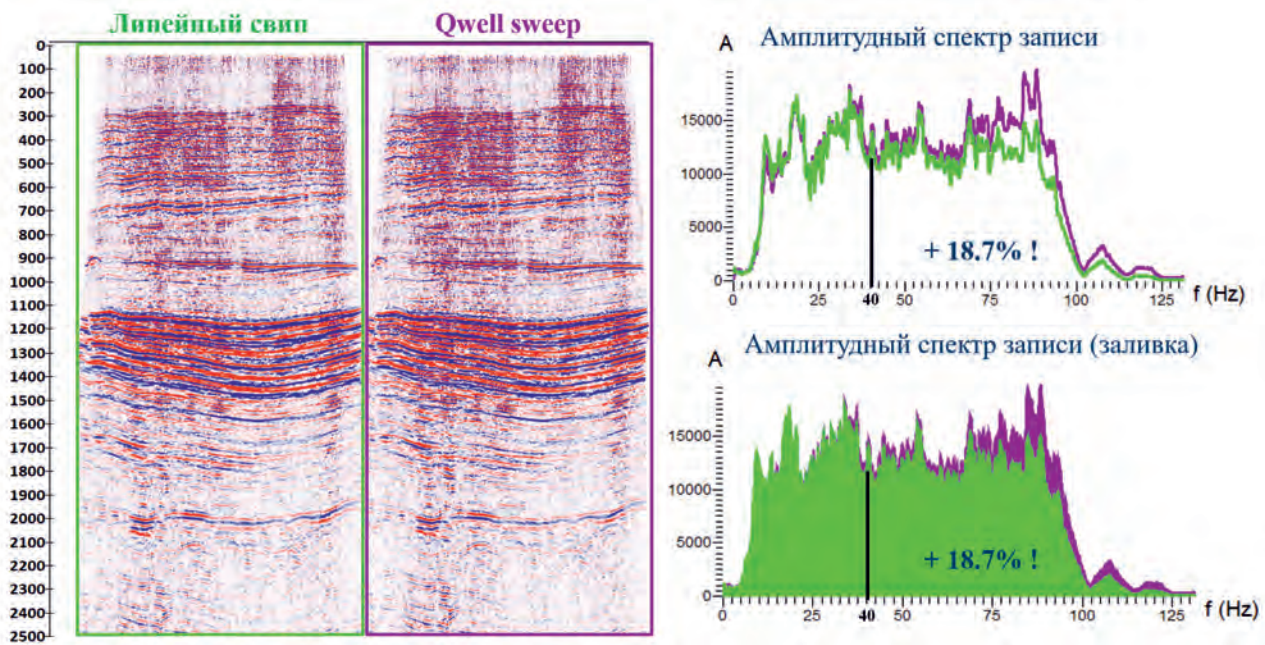
В финальном итоге, за счет применения перечисленных технологий, объединённых названием Qwell sweep, были получены сейсмограммы со всеми преимуществами, описанными ранее, в том числе с ростом центральной частоты полезных отражений целевых горизонтов с 39 Гц до 52 Гц (рост в 1.33 раза, рис.6). Незначительное уменьшение общей энергии отражений на 7%, в сравнении с использованием стандартного линейного свип-сигнала связано с

перераспределением энергии в сторону значительно более поглощающихся высоких частот и как будет показано далее не несет негативных последствий.

Малое снижение энергии низких частот (в данном примере на 10 %) не оказывает влияния на качество получаемого полевого материала, если исходные значения соотношения амплитуды полезного сигнала к помехам в окнах были достаточно высокими, как минимум превышали помехи в несколько раз, а в нашем случае составляли несколько десятков единиц. Низкие частоты тради-

▼ Рис. 6. Полевые коррелограммы, полученные со свип-сигналами Qwell.





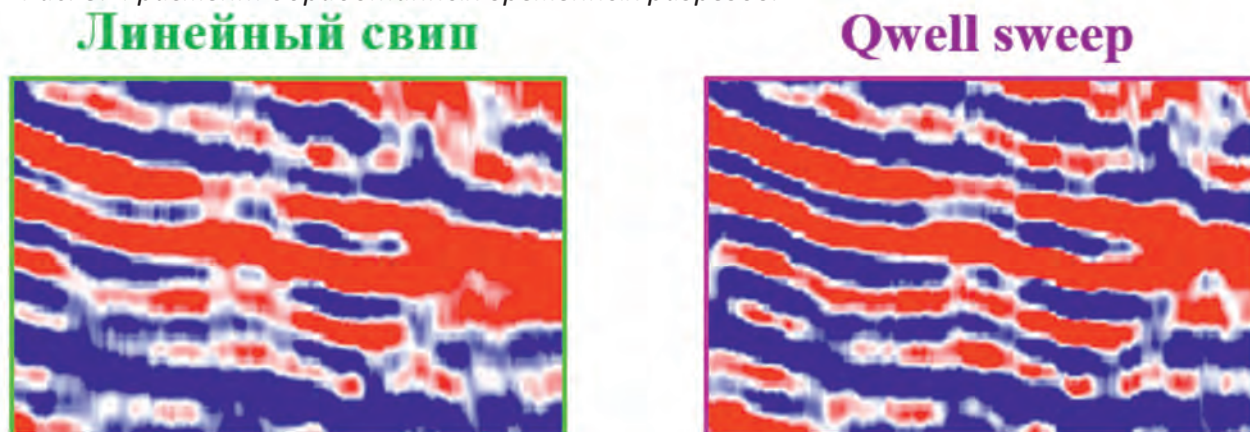
▲ Рис. 7. Сравнение результата обработки различных входных данных.

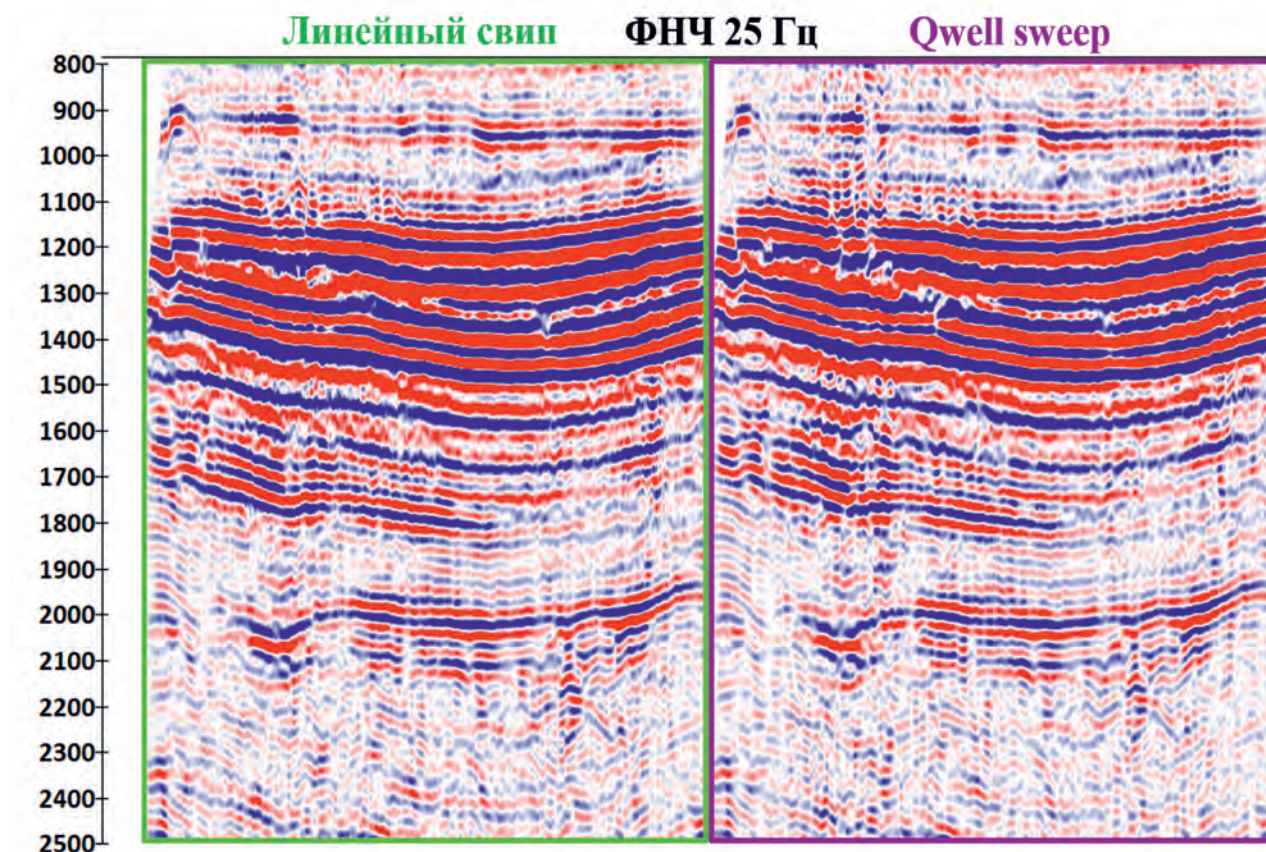
ционно доминируют в спектре записи и обладают высокой устойчивостью к помехам; незначительное снижение их амплитуды, вызванное частичным перераспределением спектра в сторону высоких частот, не ухудшает возможность выделения полезного сигнала на фоне случайных помех, что было подтверждено входе детальной обработки данных. Анализ временных разрезов, полученных с использованием как линейного свип-сигнала, так и сигналов Qwell (рис. 7), показывает, что после этапа деконволюции амплитуды полезных низких частот остаются сопостави-

мыми, обеспечивая одинаковую волновую картину низкочастотной компоненты даже для глубоко залегающих горизонтов (рис. 9).

В свою очередь высокие частоты, испытывающие значительное поглощение средой, при увеличении их энергии значительно лучше выделяются на фоне помех. Что привело к росту их амплитуды на 18.7 % на финальных разрезах после этапов шумоподавления и деконволюции. В интервале целевых меловых отложений (1.1 – 1.7 с) разрешающая способность записи повысилась на 14 %, что положительно сказалось на качестве

▼ Рис. 8. Фрагмент обработанных временных разрезов.





▲ Рис. 9. Сравнение низкочастотной компоненты волновых полей.

прослеживания фаз и позволило более эффективно выявлять маломасштабные неоднородности разреза (рис. 8). Таким образом, на данной площади без потери информативности низких частот удалось существенно повысить временное разрешение и детальность записей, Полученный опыт позволяет рассчитывать на еще большую эффективность аналогичных работ в дальнейшем.

Выводы

Многие недропользователи до сих пор традиционно выбирают линейную форму свип-сигнала, поскольку она пригодна для применения при различных поверхностных и геологических условиях, что с минимальными рисками гарантирует приемлемый результат. Однако с усложнением решаемых геологических задач и ограниченными возможностями инвестирования в геолого-

разведочные работы стало необходимым рационально и оптимально использовать имеющиеся технические средства. Современным методом повышения качества и эффективности сейсморазведочных работ является применение нескольких частотно-модулированных свип-сигналов с учетом упругого и неупругого поглощения среды. Эффективность этого подхода подтверждена сравнением итоговых материалов после детальной обработки. Грамотное применение новых инструментов при соответствующих геологических условиях позволяет снизить уровень корреляционных и нелинейных искажений, повысить разрешение сейсмических записей без потери информативности низких частот. Важно отметить, что преимущества данного метода реализуются без дополнительных финансовых и временных затрат на этапе производства.

Литература

Адиев Т.Р., Коротков И.П. Вибросейсмическая полевая методика независимого одновременного возбуждения нескольких управляемых Q-свилов для своевременного увеличения производительности работ и улучшения качества данных // Геофизика. 2023. № 6. С. 16-21.

Адиев Т.Р., Шулыкин Д.А. Вибросейсмическая полевая методика одновременного применения нескольких оптимизированных под геологию нелинейных свип-сигналов. Свип-сигнал Qwell // Приборы и системы разведочной геофизики. 2024. № 2 (81). С. 63-70.

Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. — Тверь: ООО «Издательство ГЕРС», 2011. — 412 с.

Жуков А.П., Коротков И.П., Некрасов И.А. Вибросейсморазведка с полностью управляемыми сигналами, формируемыми на основе данных ВСП // В сборнике: Труды VI Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2023. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес». Тверь, 2023. С. 97-101

Шехтман Г.А. Приповерхностные механические резонансы в разведочной геофизике // Приборы и системы разведочной геофизики. 2021. № 3 (70). С. 34-42.

Ягудин И.Р., Гафаров Р.М., Сираев И.А., Ахтямов Р.А. Влияние нелинейных искажений на качество полевых данных в вибрационной сейсморазведке // В сборнике: Геология и геофизика - 2022: наука, производство, инновации. Материалы II Международной научно-практической конференции. Тверь, 2022. С. 46-50.

Edelmann H. A. K., Werner H., 1982,

Combined sweep signals for correlation noise suppression // Geophysical Prospecting, 30, 6, 786-812.

Korotkov I., Zhukov A. Inverse Q sweep signal for broadband vibroseis acquisition // В сборнике: SEG Technical Program Expanded Abstracts. 90. Сер. "SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020" 2020. С. 116-120.