

Сравнение волновых полей ВСП, полученных с использованием различных СВИП сигналов

■ Королев Д.А., Шевченко А.А., ООО «ПетроТрейс». г. Москва

Стандартным шагом обработки вибросейсмических данных является получение коррелограмм или корреляция вибросейсмических данных с эталонным сигналом-свином. Результатом корреляции является наблюденная сейсмическая трасса, на которой сигналом источника является функция автокорреляции исходного свип сигнала. В современной вибросейсморазведке широко применяются методики, которые реализуют сложные свип сигналы или повторяющиеся вибрационные воздействия, имеющие цель расширение спектра сигнала на результирующих виброграммах (Жуков А.П. и др. 2011; Korotkov I., Zikov A., 2020). Использование комбинированных свип сигналов и повышение доли высоких частот в свипе обусловлено тем, что при возбуждении высокочастотных компонент может происходить их поглощение в механической системе вибратор-грунт. Повышению энергии высокой частоты в свипе позволяет генерировать в среде сейсмические сигналы с контролируемым частотным спектром.

Целью работы является изучение амплитудных изменений в возбуждаемом вибросейсмическом сигнале. Объект исследования - волновые поля ВСП, полученные с использованием вибраторов излучающих различные комбинированные свипы. В работе приводится сравнение волновых полей при одинаковом положении источников и приемников, но с различными сигналами в источнике. Для сравнения сигналов используется параметрический подход к определению амплитудных искажений в сейсмической записи.

Наблюдения ВСП с различными сигналами источника

Исходной информацией о возбуждаемом свип сигнале является функция автокорреляции. Для разных свипов автокорреляционные функции (АКФ) могут различаться длиной главного максимума, иметь различные по амплитуде побочные максимумы и длину «хвостов». Использование повторных наблюдений и комбинированных свип сигналов теоретически дает возможность сравнивать сейсмические волновые поля, и изучать вопросы изменения сигналов при возбуждении и прохождении в геологической среде (Адиев Т.Р., Коротков И.П. 2023). На Рис.1 приведены волновые поля ВСП с выполненной компенсацией геометрического расхождения. На фрагменте А приведено поле ВСП, полученное с импульсным источником возбуждения и при небольшом отклонении пункта взрыва от положения вибраторов, используемых при вибраци-

онном возбуждении сигнала. В качестве источника применялась небольшая 2-х литровая воздушная пушка. Это наблюдение не является эталоном, но может служить некоторой опорой для анализа изучаемой волновой картины ВСП. При вибрационных работах положение вибраторов было неизменным в течение всех проведенных работ. Последовательность наблюдений ВСП была такая, что при одном положении приборов в скважине выполнялась регистрация данных с использованием различных свипов. На трех фрагментах Б,В,Г рисунка 1. показаны разрезы ВСП для которых в качестве источника сигнала использовалась группа из 2х вибраторов, генерирующая различные свип сигналы длиной 15 сек с изменением частоты от 3 до 120 Гц.

Волновые поля, показанные на рисунке 1 получены с различными свип сигналами. На фрагменте Б рис.1. поле ВСП, получено при возбуждении линейного свип сигнала в спектре которого генери-

ровались минимально возможные начальные частоты, в данной статье свип имеет индексацию LowF. На рис.2 показаны корреляционные функции трех тестируемых свипов и на рис.3 их спектры. На фрагменте В рис.1 волновое поле ВСП получено при возбуждении сигнала для которого амплитудная модуляция выполнялась по линейному закону в области логарифмического спектра. Величина Q, определяющая линейный наклон логарифмического спектра равнялась 50. Индексация данного свипа на рисунках Q50. На фрагменте Г рис.1 волновое поле ВСП получено с модуляцией свипа с существенным увеличением амплитуды высокочастотных гармоник. Индексация данного свипа на рисунках IW1.

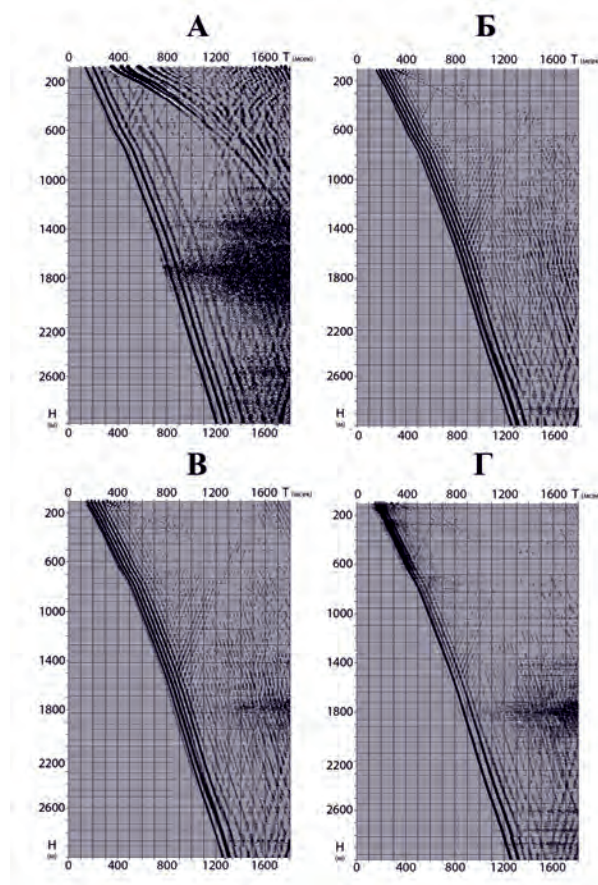
Форма падающей волны на полях ВСП при вибро-сейсморазведке определяется функцией автокорреляции используемых свипов (Рис.2). При визуализации полей на рис.1. представлена только часть волнового поля на которой видна форма падающей прямой волны. Для того чтобы данные были сравнимы между собой и были видны первые вступления ко всем данным применен мьютинг перед первыми вступлениями 75 мсек. На волновых полях сложно оценить форму излучаемого сигнала, поэтому первоначально для различных свипов мы сравниваем теоретические формы автокорреляционных функций (рис.2) и их спектры. Спектры (рис.3) приведены в двух масштабах, - линейном и логарифмическом. Сопоставляя формы АКФ и спектры мы видим, что закономерно для сигналов IW1 и Q50 главные максимумы имеют меньшую длину. Хотя за счет низкой энергии в области низких частот огибающие ФАК слабо затухают, что не приветствуется при наблюдениях ВСП. Однозначно, что с точки зрения

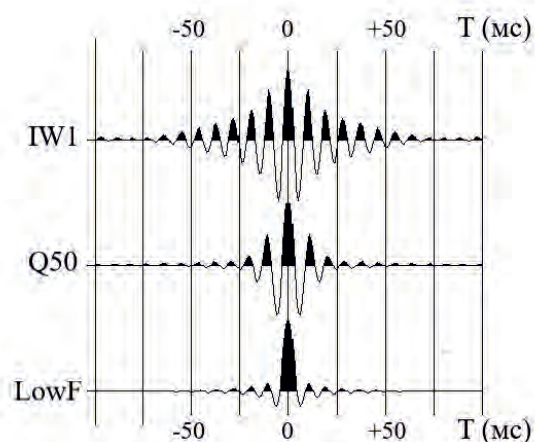
временной разрешенности сигнала наилучшая форма ФАК достигается для LowF – свипа. Свип с равномерно АЧХ (LowF) может служить некоторым базовым эталоном, показывающим возможность получения наиболее качественного сигнала с наибольшей разрешенностью в заданном диапазоне частот (3-120 Гц).

Анализ спектров опорных свипов

При возбуждении, распространение и регистрации сигналов их форма и спектр изменяются. С точки зрения анализа условий возбуждения сигналов нам было бы интересно проанализировать подобие спектров АКФ свипов на различных частотах. На Рис.4 приводятся отношения энергетических спектров. Спектры свипов IW1 и Q50 поделены на энергетический спектр широкополосного сигнал

▼ Рис.1. Наблюдаемые поля ВСП. А-импульсный источник; Б-ЛЧМ; В- Q-50; Г - IW1.

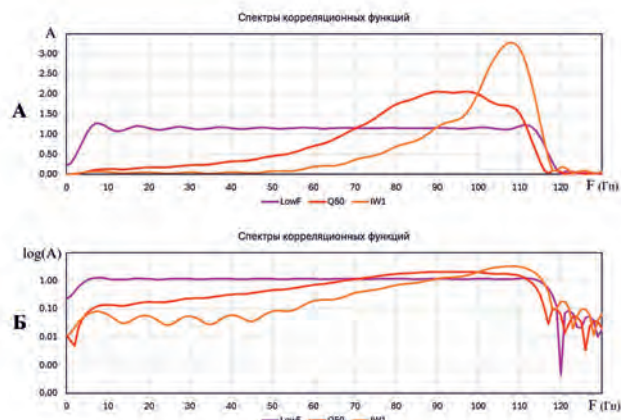
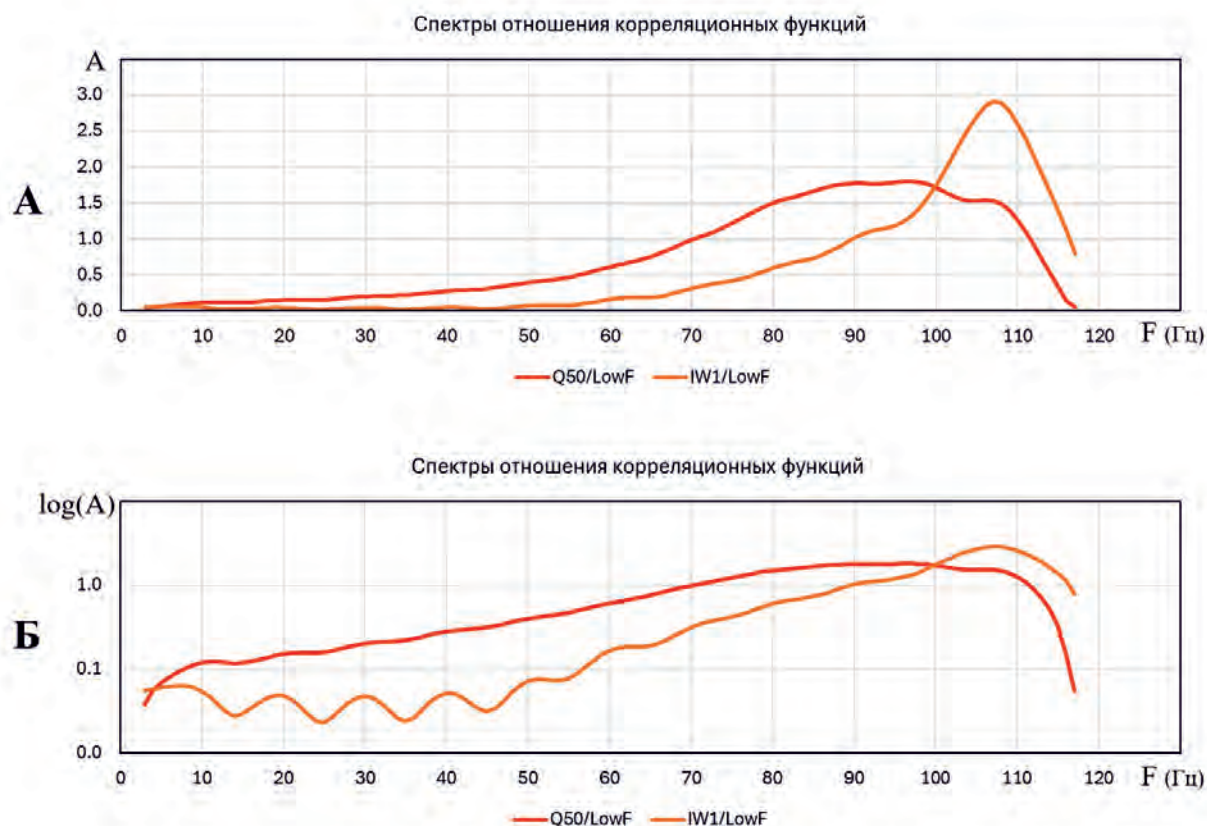




▲ Рис. 2. Корреляционные функции свип сигналов.

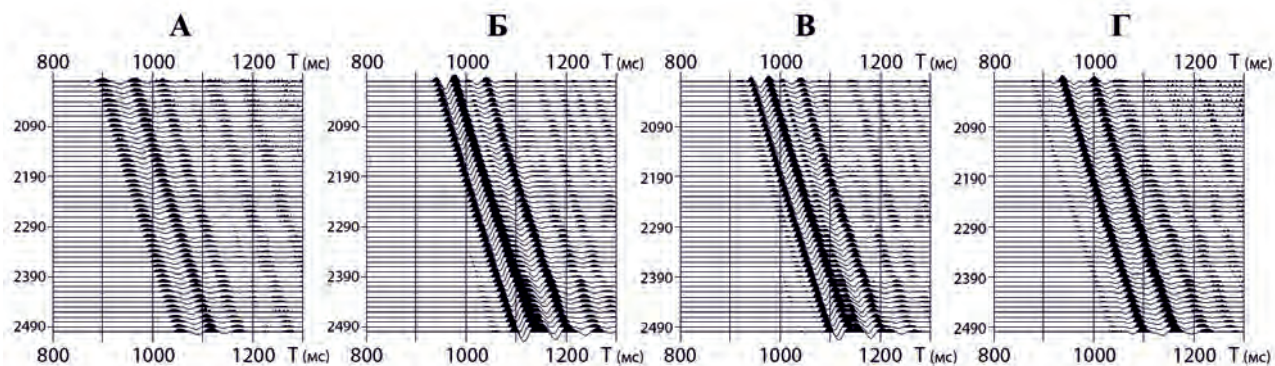
LowF. Для идеальных сигналов, то есть опорных свип сигналов, записанных на сейсмической станции, рассмотренные отношения спектров Q50 и IW1 к спектру LowF свипа повторяют исходные спектры АКФ, так как спектр LowF является константой в широком диапазоне частот.

▼ Рис.4. Спектры отношений энергетических спектров различных свипов. А- линейный масштаб; Б- Логарифмический масштаб.



▲ Рис.3. Спектры автокорреляционных функций различных свипов. В линейном (А) и логарифмическом масштабах (Б).

При выполнении наблюдения ВСП с вибраторами в среде распространяются не опорные свипы а искаженные при возбуждении и прохождении в геологической среде сигналы. Воспользуемся тем, что для фиксированного положения ПВ и ПП для сейсмической трассы с



▲ Рис. 5. Наблюдаемые поля ВСП в области анализа. А-импульсный источник; Б-ЛЧМ; В- Q50; Г - IW1.

различными свипами – импульсная характеристика среды одна и та же. Это дает право рассматривать отношения спектров АКФ трасс между собой и считать что импульсная характеристика среды не вносит никакого вклада в вычисляемые отношения спектров. Так как для трасс условия регистрации и импульсная характеристика среды не изменяется, то отношения спектров будет показывать в основном различие в возбуждения сигналов.

На рис.5 приведены фрагменты разрезов ВСП, зарегистрированные на глубине 2000-2500 метров. На всех волновых картинах форма регистрируемого сигнала различна. Представленное на фрагменте А поле получено с импульсным источником и положение источника отличается от положения вибраторов на 50 метров. Импульсный источник располагался на глубине 1 м и поэтому формирование спутников сигнала и кратных волн было такое же как для вибрационного возбуждения. На поле импульсного источника в поле падающей волны можно видеть ряд частично-кратных волн образованных в ВЧР и влияющих на форму сейсмического сигнала. Можно полагать, что подобные спутники должны быть зарегистрированы на виброг-

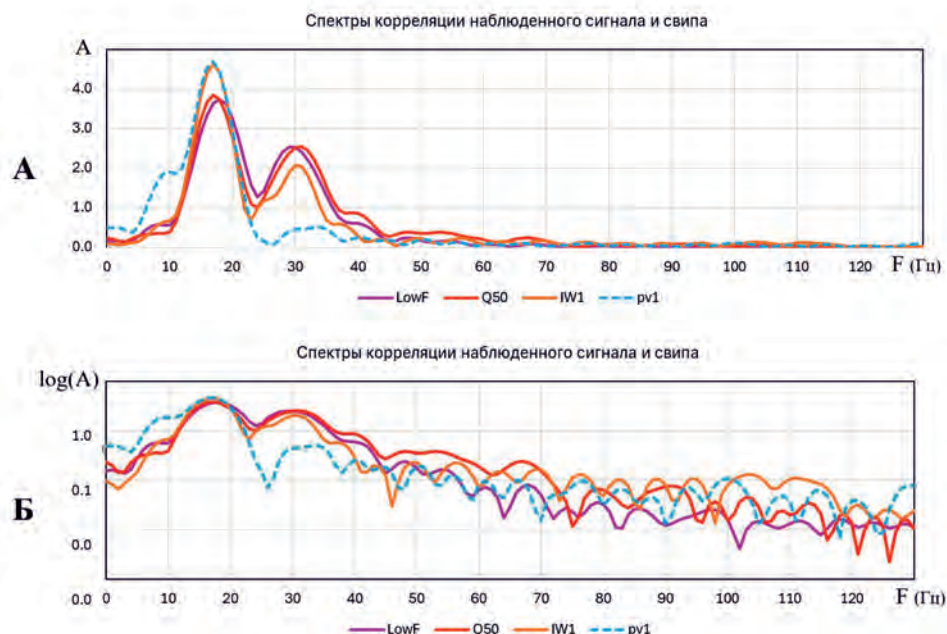
раммах. Сравнивая между собой три поля на фрагментах Б ,В, Г рисунка 5 можно видеть повторные максимумы, обусловленные спутниками. Но амплитуда максимумов в первых вступлениях в каждом волновом поле различна и определяется формой спектра свипа.

Анализ спектров падающей волны на разрезе ВСП

На рисунке 6 представлены амплитудные спектры, рассчитанные для трасс, расположенных на глубине 2290 метров. Спектры представлены в линейном и логарифмическом масштабе для того, чтобы можно было лучше контролировать различие спектров на всех частотах. Для импульсного источника основной максимум спектра на частоте 18 Гц совпадает с максимумами спектров сигналов полученных с вибрационным возбуждением. Для сигнала с импульсного источника спектр в области низких частот выше, а в области высоких частот ниже, чем для вибрационного возбуждения. На этом основании можно сказать, что вибрационное возбуждение по сравнению с импульсным источником имеет преимущество в том, что существует возможность с помощью вибраторов контролируемо изменять спектр возбуж-

► Рис.6. Спектры автокорреляционных функций одной сейсмической трассы ВСП для различных свипов. Окно анализа 500 мс.

В линейном (А) и логарифмическом масштабах (Б).



даемого сигнала, преимущественно в области высоких частот.

При сравнении спектров сигналов на фрагментах Б, В, Г хорошо видно, что спектры очень похожи между собой на частотах до 50 Гц. На спектрах вибросигналов хорошо виден максимум на 30Гц, отсутствующий на спектре сигнала импульсного источника. Различие спектров LowF, Q50, IW1 в области высоких частот происходит на относительно небольших амплитудах, но это различие хорошо видно на графиках в логарифмическом масштабе. Рассмотрим относительное изменение спектров, повторив для наблюдаемых данных расчет, показанный на рис.4. Графики отношений Q50/LowF и IW1/LowF (соответственно рис.7А и рис.7Б) представлены линиями синего цвета. Графики отношений спектров Q50 и IW1 к спектру LowF дают информацию о различии спектров в области частот от 10 до 110 Гц. При этом в знаменателе отношения спектров стоит спектр LowF, который уже не является постоянной величиной, как для опорного свипа. На рис. 6 можно видеть, что все спектры имеют два выраженных макси-

мума на частотах 18Гц и 30 Гц. Для сравнения на рис.7 представлены отношения спектров, рассчитанные для опорных сигналов (C_Q50/LowF и C_IW1/LowF). Так как абсолютные значения наблюдаемых сигналов изменились, то для каждого спектра в диапазоне 10-60 Гц была выполнена нормировка кривых, уравнивающая амплитуду опорного отношения (C_Q50/LowF и C_IW1/LowF) с графиком отношений наблюдаемых спектров (Q50/LowF и IW1/LowF). Графики нормированных опорных отношений (N_Q50/LowF и N_IW1/LowF) представлены на рис.7 пунктирной линией.

Анализируя изменения спектральных отношений можно видеть, что отношение спектров в диапазоне частот 15-60 Гц не изменилось. Для диапазона частот выше 60 Гц видно, что амплитуды гармоник для свипов Q50 и IW1 стали меньше, относительно спектра LowF. Причину относительно большего затухания амплитуд по данному эксперименту выяснить сложно. Можно только отметить факт, что для свипов с увеличением амплитуды высокочастотных гармоник происходит различное (в зависимости от

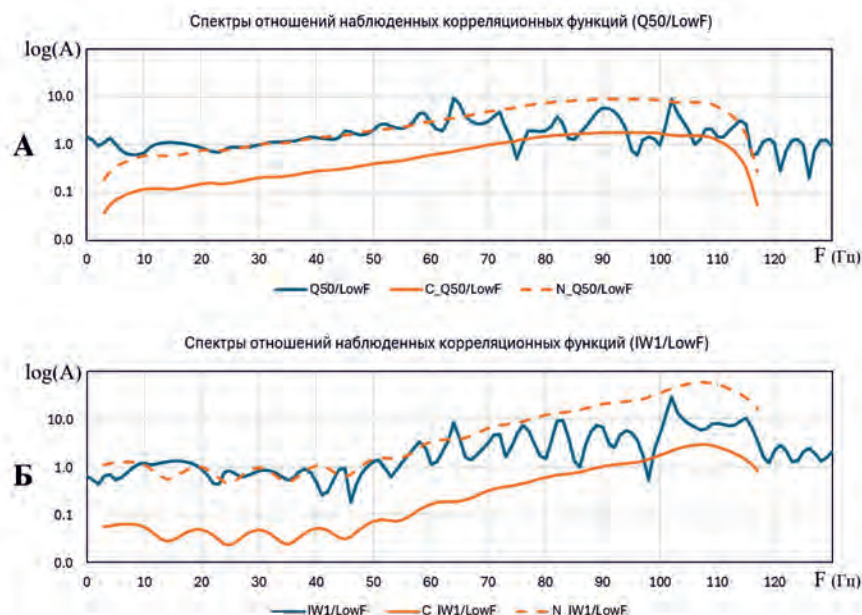


Рис. 7. Спектры отношений автокорреляционных функций одной сейсмической трассы ВСП для различных свипов. Окно анализа 500 мс. В логарифмическом масштабе.

амплитуды) поглощение в диапазоне частот выше 60 Гц в данном полевом эксперименте.

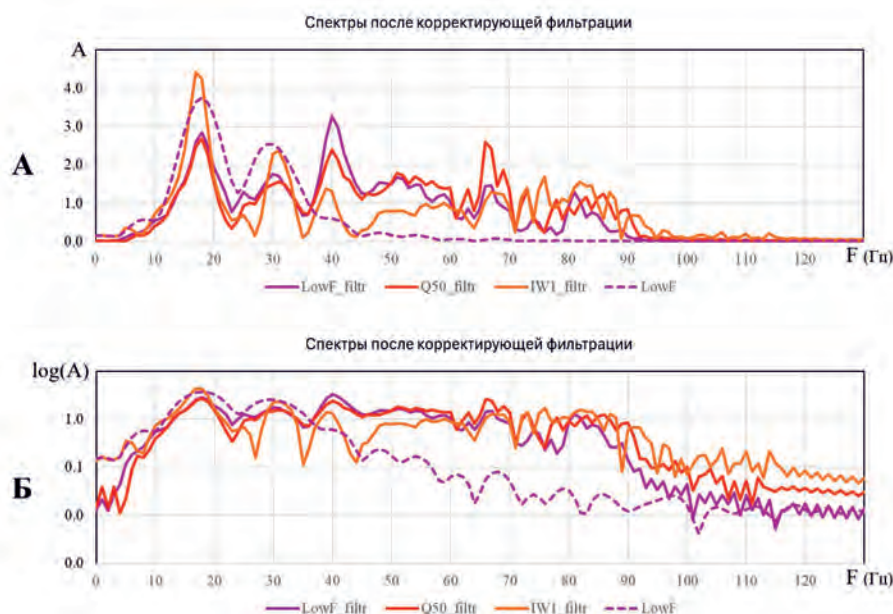
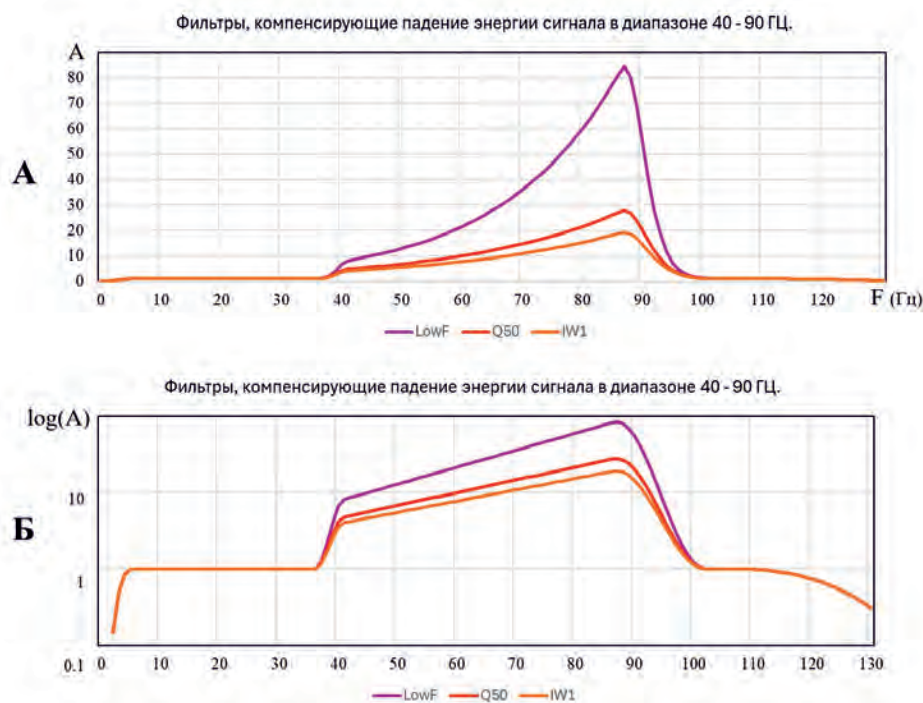
Корректирующая фильтрация данных ВСП

Для того чтобы определить эффективность различных методов возбуждения сигнала для проведения работ ВСП выполним корректирующую амплитудную фильтрацию волновых полей. Используем для компенсации высокочастотных компонент полосовые фильтры, построенные по принципу компенсации поглощения. Для этого используются фильтры, зависящие только от одного параметра Q . Где Q коэффициент линейного искажения логарифмического спектра фильтра (Королев Д.А. и др. 2022). На рис.6 были приведены спектры трех различных трасс, и обсуждались особенности изменения частотного состава спектров в области высоких частот. Для компенсации искажений в области высоких частот используем Q фильтры в диапазоне 40-90 Гц. На рисунке 8 приведены спектры фильтров, которые подобраны для

компенсации полей ВСП. Самая большая компенсация потребовалась для восстановления высокочастотных компонент для ЛЧМ свипа с постоянными амплитудами (LowF). Приведенный на рисунке спектр соответствует фильтру в полосе частот 35-40-90-100 Гц, значение параметра $Q=80$. Для волновых полей Q50 (рис. 5, В) и IW1 (рис. 5, Г) применены фильтры, построенные в том же диапазоне частот, с параметрами $Q=90$ и $Q=100$ (соответственно для фильтров Q50 IW1).

По спектрам трасс после применения коррекции можно видеть, что восстановление высокочастотных составляющих спектров сигнала с помощью полосовых Q фильтров выполнен достаточно хорошо. На спектрах с линейным масштабом (рис.9А) можно видеть, что спектры всех вибросигналов имеют похожую структуру, совпадающие по положению локальные максимумы и минимумы. Это означает что импульсная характеристика среды на данной трассе ВСП сохраняется при выполнении коррекции. На спектрах в логарифмическом масштабе (рис.9Б) хорошо видно, что уровень усиления для различных вибросигналов после коррек-

► Рис.8. Спектры корректирующих Q-фильтров, используемых для коррекции вибросейсмических записей. А-линейный масштаб; Б – логарифмический масштаб.



◀ Рис.9. Спектры трассы ВСП (H=2290м) после применения корректирующих фильтров. А-линейный масштаб; Б- Логарифмический масштаб. Сиреневый график пунктирная линия – Спектр LowF свипа до применения корректирующего фильтра.

ции близок к постоянной составляющей. По сравнению со спектром LowF до коррекции (пунктирная сиреневая линия) видно существенное усиление спектров на частотах выше 40 Гц.

Результаты сравнения волновых полей рисунок 10 до и после коррекции подтверждает рассмотренные спектральные изменения. На фрагментах А и Б выполненная Q-фильтрами коррекция привела к очень хорошему совпадению восста-

новленных полей. Несмотря на то, что данные со свипом Q50 до коррекции были более высокочастотными, после коррекции данные LowF и Q50 почти не отличаются друг от друга. Применяемые для коррекции фильтры затрагивали спектральный диапазон 40-90 Гц. По-видимому низкочастотная область спектра для двух волновых полей была похожей, что позволило получить близкие результаты коррекции. Волновое

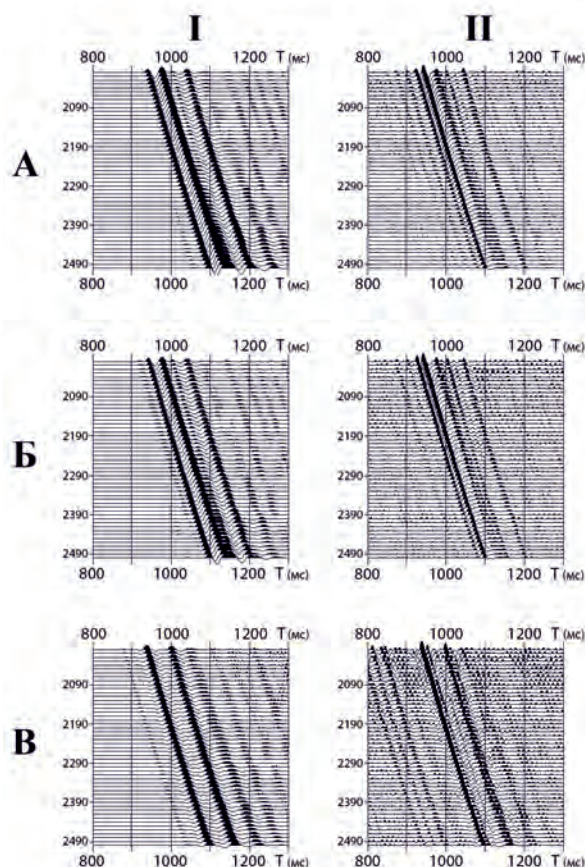
поле, зарегистрированное с высокочастотным сигналом IW1 после коррекции восстановилась не так хорошо. На фрагменте рис.10В после коррекции наблюдается высокий уровень высокочастотных шумов. При анализе по спектрам высокочастотная часть спектра сигнала IW1 восстановлена хорошо. Но различие с данными LowF и Q50 на низких частотах большая. Это привело к тому, что форма волнового поля сильно отличается и на результатах наблюдается больший уровень помех. Сравнение данных говорит о том, что использование свипов с большим градиентом амплитуд между низкими и высокими частотами может потребовать более существенной обработки, чтобы быть сравнимым с результатами наблюдений с обычными ЛЧМ свипами. Для обработки наблюдаемых (IW1 – свип) данных требуется дополнительное восстановление волнового поля на низких частотах и возможно фазовая коррекция наблюдаемых данных.

Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам ООО «Геофизические системы данных» Жукову А.П. и Короткову И.П. за возможность анализа полевых данных и конструктивные советы при обсуждении результатов вибрационных наблюдений, представленных в статье.

Выводы

В представленной работе выполнен анализ и коррекция формы падающей волны, наблюдаемой на данных ВСП с различными свип сигналами. При визуальном анализе и на амплитудных спектрах хорошо видно повышение частотного состава волнового поля при применении свипов с увеличенным уровнем



▲ Рис. 10. Поля ВСП до (столбец - I) и после применения корректирующей фильтрации Q-фильтрами в диапазоне 40-90Гц (столбец - II). А-ЛЧМ сигнал LowF; Б – сигнал с линейным возрастанием амплитуды в логарифмическом спектре - Q50; В – сигнал с повышенными амплитудами в области высоких частот - IW1.

амплитуд на высоких частотах. На низких и средних частотах от 10 до 50 Гц поглощение пропорционально энергии сейсмического сигнала, возбуждаемого вибратором. Для высокочастотных свипов, по сравнению со стандартным линейным свипом, на частотах выше 50 Гц наблюдается дополнительное уменьшение энергии наблюдаемого сейсмического сигнала. На полевых данных ВСП показано, что компенсация потери энергии на высоких частотах может быть выполнена с помощью специальных корректирующих фильтров. Так как

используемые фильтры могут вносить только линейные (в логарифмической области) изменения спектра, то их использование предполагает сохранение без искажения частотной характеристики среды.

Литература

1. Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Тверь, 2011.

2. Адиев Т.Р., Коротков И.П., Вибро-сейсмическая полевая методика независимого одновременного возбуждения нескольких управляемых Q-свилов для совместного увеличения производительности работ и улучшения качества данных. Геофизика 2023. № 6. с.16-21.

3. Korotkov Ilya, Zukov Aleksander. Invers Q sweep Signal for Broadband Vibroseis Acquisition. In SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2020.p.116-120

4. Королев Д.А., Королев А.Е., Шевченко А.А. Параметрические методы коррекции сигналов в вибросейсморазведке. Международная геолого-геофизическая конференция «ГеоЕвразия – 2022. Геологические технологии: наука и бизнес». Москва 2022.

Подробнее об авторах



Королев
Димитрий Александрович

Геофизик компании ООО «ПетроТрейс». Окончил Российский государственный университет нефти и газа (Научно-исследовательский университет) имени И.М. Губкина в 2020 г. и аспирантуру кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ в 2023 г. Сфера интересов – теоретические аспекты деконволюции сейсмических данных.



Шевченко
Алексей Александрович

Руководитель технологического департамента ООО «ПетроТрейс»

В 1981 г. окончил МИНХ и ГП им. И.М. Губкина. Работал в компаниях ЦГЭ МНП, СП МДСЕЙС, ПетроАльянс, Шлюмберже. К.т.н. Автор более 50 публикаций. Член ЕАГО, EAGE, SEG.