

Введение

В полевой геофизике инжиниринг является слабым звеном между исследовательской работой и производственной деятельностью, в отличие от «заводской» промышленности – того же геофизического приборостроения. Внедрение новинок происходит на фоне неоптимального применения уже апробированных технологий [19]. Не хватает ясности с количественными критериями эффективности, способами удовлетворения этим критериям и оценки соотношения результата и понесенных затрат [13, 14, 16]. В настоящей работе рассмотрены возможности комплексного совершенствования применяемых ныне методик МОГТ.

Качество и оптимальность

Качество в сейсморазведке – это, в конечном итоге, информативность сейсмического образа среды. Как это соотносится с количественными характеристиками волнового поля первичной записи и сейсмического разреза? Совместное использование таких понятий, как разрешенность и отношение сигнал/помеха, оставляет некую неопределенность [1, 2, 4, 10, 11, 13, 14]. Опираясь на определение Н. Винера для количества информации [3], информативность сейсморазведки можно оценить через логарифмическую меру близости сейсмической инверсии к истинному распределению импедансов. Фактический материал сейсморазведчика – сейсмотрасса, представляющая свертку импульса с последовательностью элементарных отражений. Последняя, при контрастах импеданса, характерных для сейсморазведки [2, 11], равна производной функции логарифма импедансов $\log I(t)$ с точностью до малого второго порядка. В силу линейности связи между этими функциями, их наилучшее восстановление в присутствии помех (с точностью до константы) одинаково зависит от распределения отношения сигнала/помеха по оси частот $S(f)/N(f)$ и выполняется в соответствии с принципами оптимальной корректирующей фильтрации, частным случаем которой

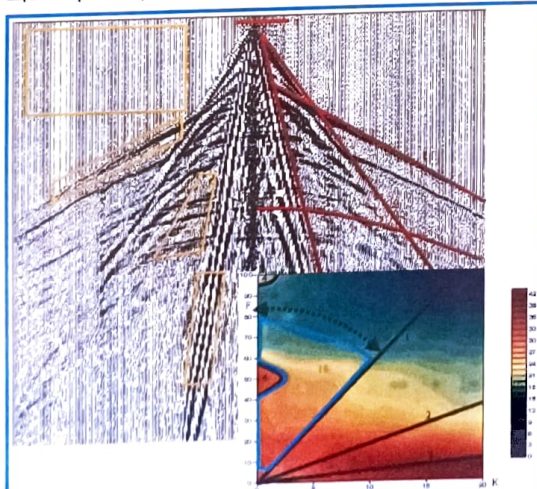


Рис.1. Полевая сейсмограмма и ее ФК-спектр. 1-3 – волны с прямолинейными осями синфазности, 4 – синфазная наводка 50 и 100 Гц, 5 – волны с гиперболическими волнами синфазности. Зоны доминирования энергии различных типов волн в x-t поле: 6 – микросейсмы, 7 – преломленная волна, 8 – отраженная волна, 9 – поверхностная волна. В ФК-поле энергия полезного сигнала доминирует в области 10.

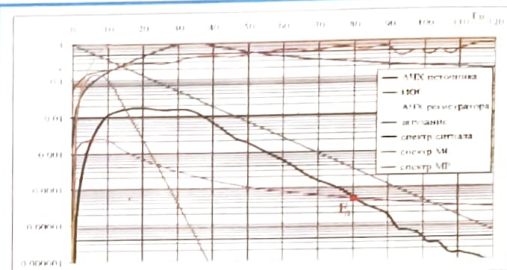


Рис.2. Формирование спектра волнового поля. Показаны АЧХ источника и регистратора, ИОС – спектр импульсного отклика среды, частотно-зависимое затухание, их произведение – спектр полезного сигнала, спектры микросейс МС и медленных регулярных помех МР.

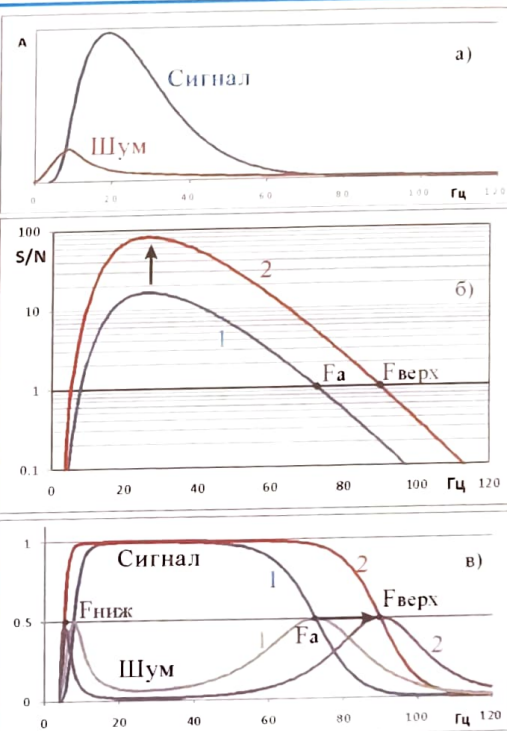


Рис.3. а) Спектр сигнала и шума на полевой записи. б) Отношение $S(f)/N(f)$ для спектров (а): 1 – на одиночной записи и 2 – на суммотрассе. в) Соответствующие спектры сигнала и шума после оптимальной обратной фильтрации.

является обратная фильтрация [10]. Из латеральной протяженности изучаемых объектов следует еще и требование однородности качества сейсмограмм на всей площади работ.

Чего стоит увеличение $S(f)/N(f)$? Если это делается за счет кратности (т.е. увеличения количества ПВ, плотности ЛВ и ЛП), то себестоимость может оказаться пропорциональной отношению сигнал/помеха с коэффициентом, близким 1, что и определяет максимально приемлемую цену соответствующего прироста информации. Достижение аналогичного результата при меньших затратах – один из основных критериев методической оптимизации. В сложных системах изменение одного из параметров неизбежно влечет изменение остальных, поэтому необходимо комплексное решение.

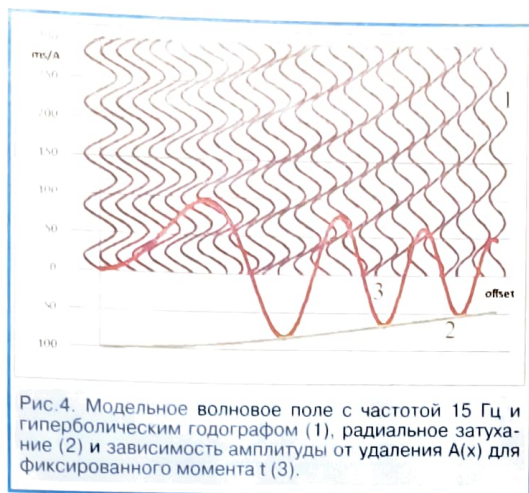


Рис.4. Модельное волновое поле с частотой 15 Гц и гиперболическим годографом (1), радиальное затухание (2) и зависимость амплитуды от удаления $A(x)$ для фиксированного момента t (3).

Волновое поле на сейсмограмме

Полевая сейсмограмма по одной приемной линии (рис. 1) представляет двумерную матрицу в пространстве x - t , которому соответствует спектральное пространство F - K . В обоих пространствах имеются области, в пределах которых доминирует энергия определенного типа волны, но их вид и взаимоположение различны в этих пространствах. Далее мы рассмотрим возможности выделения полезного сигнала в каждом измерении – F , K , x , t – на фоне двух, пожалуй, основных типов помех – регулярных, т.е. связанных с источником, но не несущих полезной информации колебаний, и микросейсм.

FK-область

F -спектр сигнала есть произведение частотных характеристик источника, среды, регистрирующего тракта и затухания (рис.2) [10]. Затухание оказывает определяющее влияние на правую часть спектра сигнала. Спектр микросейсм превышает спектр сигнала как на самых низких частотах, так и на высоких, начиная с некоторой частоты F_a , а регулярные помехи обычно доминируют в левой части спектра. В неблагоприятных случаях спектр сигнала ниже спектра помех во всем диапазоне частот.

При увеличении S/N во всей полосе частот (накопление по ОПВ, ОГТ) область $S/N > 1$ раздвигается (F_a переходит в $F_{\text{верх}}$, рис. 3). На трассе после оптимальной обратной фильтрации отношение сигнал/шум при этом растет значительно меньше, но расширяется спектр, основная же часть энергии шума переходит на более высокие частоты. Таким образом, для оптимизации источника необходимы увеличение его амплитуды $A(f)$, в первую очередь в области $F_{\text{ач}}$ – $F_{\text{верх}}$, и снижение регулярных помех.

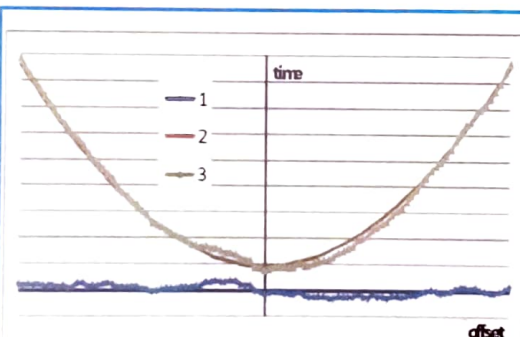


Рис.5. Слева – график стат.поправок вдоль профиля (1), гиперболический годограф (2) и реальный годограф без введенной статьи (3). Справа – наклон гиперболического годографа с «коридором» среднеквадратического отклонения (1) и соответствующее нормальное распределение (2).

Рассмотрим пространственные спектры (K -спектры) сейсмограммы. Для отраженных волн экспериментальные определения затруднены интерференцией с другими типами колебаний, однако их основные кинематические и динамические свойства поддаются моделированию. Если каждую точку среды рассматривать как центр дифракции, то суперпозиция их волновых полей и есть поле отраженных волн. Для гармонической составляющей с заданной частотой, гиперболическим годографом и некоторым радиальным затуханием зависимость $A(x)$ имеет вид, показанный на рис. 4. Волновое число K такой волны пропорционально наклону годографа. Для моночастоты последний зависит от удаления x , но не зависит от времени t , что позволяет вместо наклона при фиксированном t использовать просто производную годографа дифрагированной волны с источником на глубине h :

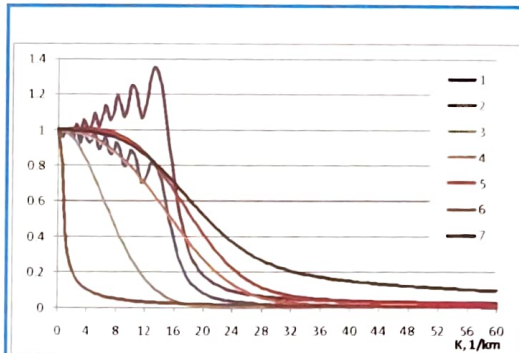
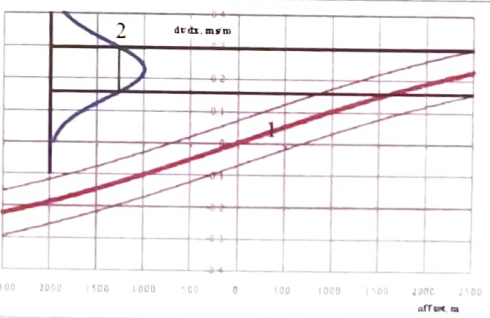


Рис.6. Вид модельного K -спектра сигнала с гиперболическим годографом до и после поправки за радиальное затухание (1 и 2), распределение флуктуаций наклона годографа (3), свертка (1) и (2) с (3) – (4) и (5) соответственно, K -спектр амплитудной неидентичности (6) и его свертка с (5) – (7), т.е. K -спектр сигнала с учетом всех факторов.

$$m(x) = dt/dx = 2x/v\sqrt{h^2 + x^2};$$

$K(x) = d\phi(x)/2\pi dx = fm(x) = 2fx/v\sqrt{h^2 + x^2}$ – «мгновенное» волновое число.

Плотность K -спектра обратно пропорциональна второй производной годографа, умноженной на радиальное затухание $\alpha(x)$: $\alpha(x)/(dK(x)/dx)$. Это легко представить по аналогии со свип-сигналом, где $K(x)$ соответствует $f(t)$. При этом спектральная плотность свипа пропорциональна обратной величине скорости развертки, $dt/df(t)$. В эксперименте расчет K -спектра выполнялся непосредственно по модели поля.



МВС: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

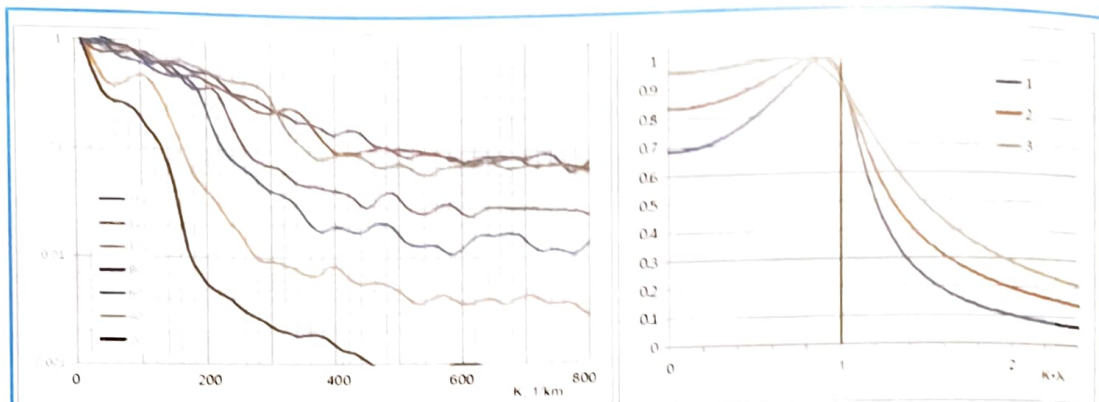


Рис. 7. Слева - экспериментальные К-спектры для различных частот (шифр графиков). Справа - модельные К-спектры гармонической составляющей микросейсм, волновое число нормировано к пространственному периоду данной гармонике. Радиальный и экспоненциальный инкременты затухания соответственно: (1) 0.5 и 0.1, (2) 1 и 0.1, (3) 1 и 0.2

Учет неоднородности ЗМС. Локальные изменения наклона годографа за счет статистики $t_{dev}(x)$ аддитивны и нормально распределены со среднеквадратичным отклонением $\Delta x_s / \Delta t_s$ [7] (рис.5):

$$dt/dx = 2x / v \sqrt{h^2 + x^2} + t_{dev}(x)$$

и учитываются сверткой «идеального» К-спектра с функцией распределения:

$$S_k(K) = \exp(-\Delta x_s / \Delta t_s \cdot (m_0(x) - m(x))^2 / \pi f) \cdot (\alpha(x) / (dK(x)/dx))$$

Амплитудная неидентичность характеризуется пространственным спектром $S_a(K)$, пропорциональным K^{-1} (получено из расчетов К-спектров для ряда экспериментальных записей с малым шагом ПП), имеет мультипликативный характер и учитывается сверткой спектров:

$$S(K) = S_k(K) * S_a(K)$$

На рис.6 проиллюстрировано моделирование К-спектра отраженной волны с параметрами, характерными для Зап.Сибир. и частотой 90-100 Гц.

Регулярные помехи моделируются аналогично. У волн, распространяющихся выше подошвы ЗМС, амплитудная и кинематическая вариативность меньше. Энергия помех с прямыми осями синфазности сконцентрирована в линейных областях FK-спектра [10] (т.е. их К-спектр для заданной частоты узок, но высок по амплитуде) и, в силу меньших скоростей, характеризуется большими волновыми числами, чем полезный сигнал.

Микросейсм же рассматриваются как недетерминированные колебания. Зато их К-спектр поддается экспериментальному изучению при помощи «точной» регистрации с малым шагом

ПП. На рис.7, слева, показан вид экспериментальных К-спектров для различных значений частоты. Чтобы полнее осмыслить результат, использована модель, в которой поле микросейсм описано как суперпозиция колебаний, распространяющихся от множества некогерентных точечных источников, равномерно распределенных по поверхности (корни трав и т.п.). Поле одного источника

$$A(\omega, r) = A_0 e^{i(kr - \omega t)} e^{-\alpha(r)}$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ - расстояние от источника, v - скорость, d и $\alpha(f)$ - радиальный и экспоненциальный инкременты частотно-зависимого затухания. Тогда для гармоники с частотой одномерный К-спектр на оси x плоскости (x, y)

$$A(\omega, k, y) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y, \omega) e^{-ikx} dx$$

Очевидно, что все точки, равноудаленные от оси x , дают одинаковый вклад в одномерный К-спектр энергий, рассчитанный вдоль оси. Вклад всех точек, расположенных на одной прямой, нормальной к оси x , для случайных колебаний описывается через совокупность их энергетических спектров

$$A^2(\omega, k) = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(k, y, \omega) dy$$

То есть квадратичный К-спектр гармоник микросейсм с некоторой частотой в этой модели есть не что иное, как спектр одномерной ФАК двумерного (радиально-симметричного) распределения комплексных амплитуд.

Согласно модели, К-спектр для заданной гармоник быстро спадает после числа K , соответствующего данной длине волны, и по мере роста радиального и диссипативного инкрементов затухания (рис.7, справа) выполаживается, в пределе стремясь к «белому» спектру. Результат моделирования позволяет предположить, что энергия реальных микросейсм распределена между колебаниями с разной скоростью распространения. На частотах до 100-120 Гц К-спектр заметно спадает после числа K , отвечающего наименьшей скорости распространения колебаний (200-300 м/с в данном случае). Его вид свидетельствует о значительных инкрементах затухания. До 40 Гц большая часть энергии принадлежит волнам со скоростями более 1 км/с (т.е. под подошвой ЗМС), а радиальное затухание значительно меньше. Во всей полосе частот К-

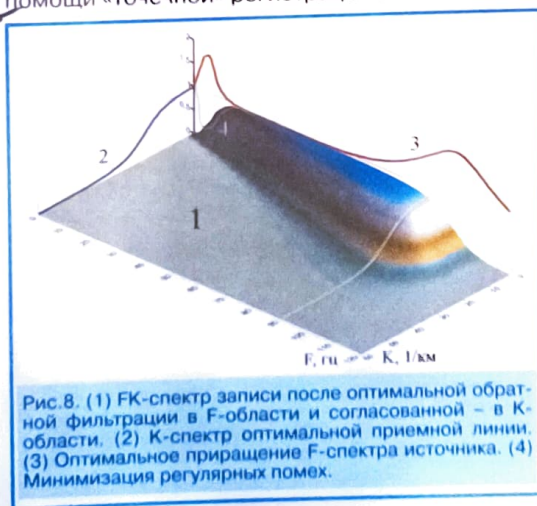


Рис.8. (1) FK-спектр записи после оптимальной обратной фильтрации в F-области и согласованной - в K-области, (2) К-спектр оптимальной приемной линии, (3) Оптимальное приращение F-спектра источника, (4) Минимизация регулярных помех.

спектр микросейсм значительно шире, чем К-спектр полезного сигнала.

Мы использовали FK-спектральный представления для всех компонент сигнала микросейсм (вместо более узкого понятия радиуса корреляции помех). Это позволяет в рамках единого подхода построить эффективный согласованный К-фильтр выделения сигнала для любого значения F по отношению ко всем типам помех. Итак, для оптимизации всего комплекса источник-приемная линия необходимо обеспечить (рис.8):

1. В частотной области - увеличение (перераспределение) энергии сигнала преимущественно в частях спектра, окружающих значения частоты, для которых на суммотрассе $S(f)/N(f)=1$, и снижение регулярных помех.

2. В пространственной области - структуру системы наблюдения (включая параметры группирования), позволяющую реализовать согласованную К-фильтрацию сигнала на максимальной частоте, на которой возможно выделение полезного сигнала в соответствие с п.1, и на всех частотах до указанной.

Оптимизация F-спектра источника

Для оптимизации взрывного источника важен не только учет волны-спутника [12], но и выбор среды, в которой достигается максимальная собственная частота (1 на рис.9). Для этого необходимо оптимизировать глубины скважин на всей площади работ и подобрать соответствующую массу заряда (2 на рис.9). В ряде случаев избирательный прирост амплитуды в желаемой полосе частот (3 на рис.9) за счет оптимизации АЧХ собственно источника может даже превосходить эффект интерференции с волной-спутником. На стадии опытных работ оценка прироста амплитуды в спектральной области может быть получена непосредственно из отношения спектров записей с разными источниками. Этот подход значительно содержательнее, чем простое сравнение амплитуд и «видимых частот».

С вибрационным источником аналогичный эффект достигается перераспределением спектральной плотности сигнала посредством переменной по частоте скорости развертки свипа [20]. Следует применять удобные в задании и простые функции развертки (рис.10). При использовании НЧМ-сви́па необходимо, чтобы частота равной спектральной плотности с ЛЧМ-сигналом оставалась в области, где на первичной записи $S(f)/N(f)>1$. Поэтому от выбора частотного диапазона зависит даже больше, чем от инкремента развертки. Что касается импульсных невзрывных источников, то для них нелишней опцией была бы возможность удобно и целенаправленно регулировать, хотя бы в небольших пределах, собственную частоту. Пожелаем производителям оборудования, чтобы развитие невзрывных технологий шло и в этом направлении тоже. Подробнее по вопросам оптимизации

источника на стадии как опытных, так и производственных работ см.[5-8, 12, 13].

При проведении работ в изменчивых поверх-

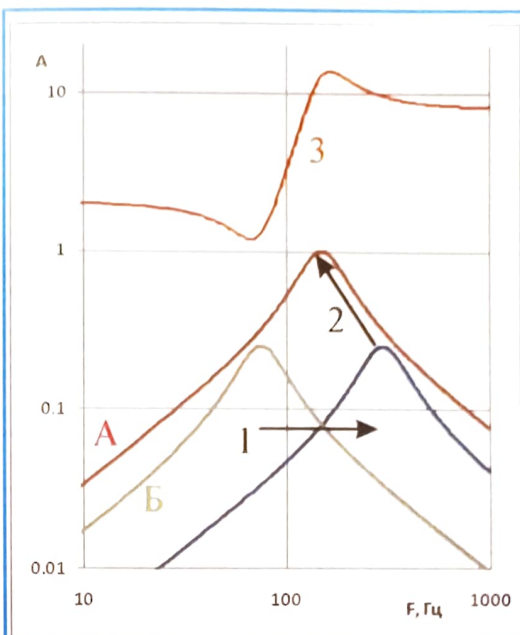


Рис.9. Принципиальная схема оптимизации АЧХ взрывного источника путем выбора для размещения заряда среды, обеспечивающей максимальную собственную частоту (1) и выбора массы заряда (2), обеспечивающие оптимальный прирост АЧХ (3 – отношение А и Б).

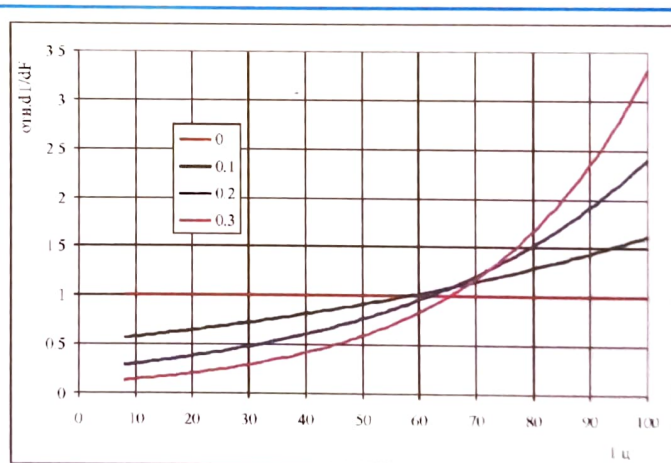


Рис.10. Изменение спектральной плотности развертки вибросви́па типа N дБ/Гц в зависимости от инкремента N (шифр графиков), нормировка к ЛЧМ-сви́пу (N=0).

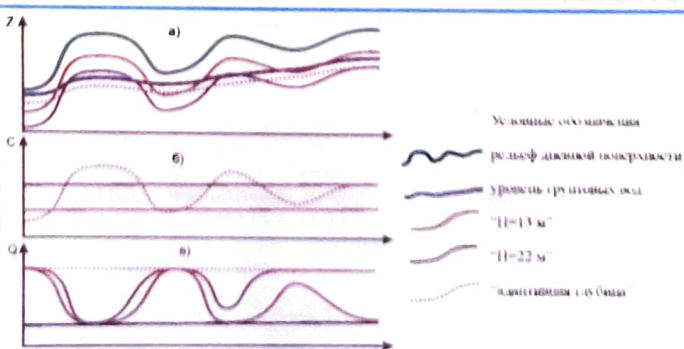


Рис.11. а) – альтитуды рельефа, подошвы ЗМС и положения забоев взрывных скважин; б) – соответствующие затраты на подготовку ПВ; в) – условное качество полевого материала.

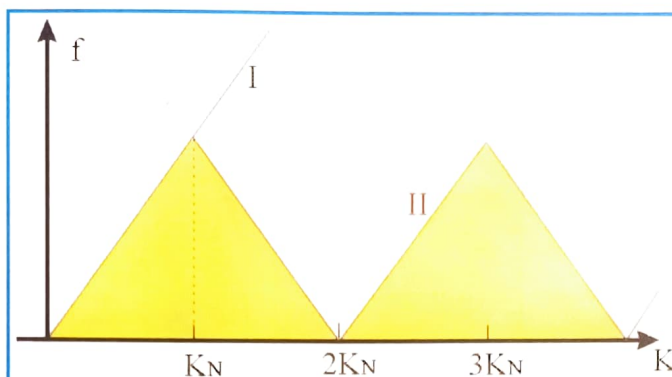


Рис. 12. Схема работы FK-фильтра с конечным шагом ПП. KN – волновое число Найквиста, I – граница области пропускания без алясинга, II – граница области пропускания для «зеркальных» волновых чисел. Заливкой обозначены FK-области фактического подавления.

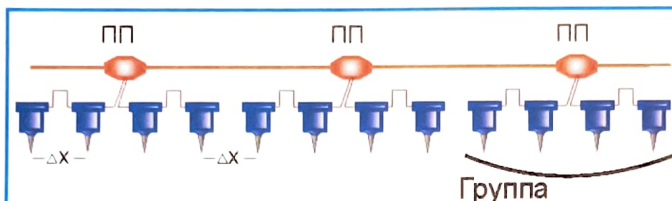


Рис. 13. Схема сплошной приемной линии.

ностных условиях иногда в качестве основного критерия качества выдвигают соблюдение «технических условий», например, постоянной глубины скважин. Однако, принцип оптимального источника требует постоянства характеристик сигнала. Эта ситуация проиллюстрирована на рис.11. Для некоторого рельефа и положения подошвы ЗМС и двух вариантов постоянной глубины взрывных скважин (13 и 22 м) имеются участки с низким качеством записи, хотя и различной величины, но определяющие примерно один уровень, по которому приходится выравнивать частотный диапазон разрезов. Адаптивный выбор глубины от 10 до 27 м позволяет получить равномерно высокое качество записей и разрезов. При этом общие затраты на возбуждение (примерно пропорциональные глубине скважин) меньше, чем в случае скважин с постоянной глубиной 22 м. Еще один принципиальный момент лежит в плоскости контроля качества. Дело в том, что постоянство глубины, как таковое, не поддается надежной проверке, тогда как постоянство характеристик записи контролируется непосредственно.

С невзрывным источником аналогичным примером служит, с одной стороны, использование постоянных параметров возбуждения при любых поверхностных условиях и уровне шумов, а с другой – адаптивный выбор накопления и параметров развертки свип-сигнала.

Особенность взрывного возбуждения состоит в том, что изменение соотношения качество/затраты в зависимости от глубины погружения заряда может быть очень резким.

Мы коснулись только частотных свойств одиночного источника. Пространственное группирование (как источников, так и приемников) рассмотрим в контексте следующего раздела.

Оптимизация системы в K-области

Предложенный принцип оптимизации системы наблюдения указывает на ее частотно-зависимый характер и требует рассмотрения в двумерной, т.е. FK-области. Выделение колебаний с

заданной кинематикой осуществляется веерной FK-фильтрацией. В случае недостаточной пространственной дискретизации у такого фильтра появляются «зеркальные» области пропускания (рис.12). Чтобы избежать этого, необходим субметровый шаг геофонов по профилю. Однако подключение регистрирующего блока (около \$1000) к каждому такому геофону экономически неприемлемо.

К счастью, пространственный фильтр выделения сигнала в нашем случае низкочастотный, и это позволяет реализовать его в виде последовательности аналогового K-фильтра и цифровой FK-фильтрации при последующей обработке записи. Для этого несколько соседних геофонов объединяются в группу таким образом, чтобы шаг ПП, тождественно равный базе группы (рис.13), отвечал критерию Найквиста по отношению к полезному сигналу. Тогда количество регистрирующих модулей (по одному на группу) уменьшается на порядок. Группа играет роль антиалясингового K-фильтра [15, 17, 18]. Ее роль как усилителя (сумматора) электрического сигнала при современной аппаратурной базе незначительна. Назовем такую конфигурацию сплошной приемной линией, а группу, тождественно равную шагу ПП – модулем этой линии.

Для нее на рис. 14 в виде FK-панелей показаны K-характеристика линейной группы, характеристика FK-фильтра с зеркальными областями и их произведение. Последнее как раз и представляет субоптимальный FK-фильтр (здесь K нормировано к волновому числу Найквиста для шага ПП). Разумеется, для его реализации необходимо тщательное соблюдение базы группы в любых обстоятельствах. Подчеркнем еще раз, что т.н. «внутригрупповая» дисперсия учтена K-спектрами сигнала и группы. То есть правильно рассчитанное группирование лучше «точной» регистрации.

На рис.15 показаны характеристики такого фильтра в K-области для некоторых фиксированных частот. Если шаг ПП примерно в 1.5 раза чаще предела Найквиста относительно полезного сигнала, то эффективность фильтрации уже не менее 90% от «идеальной», хотя K-фильтр и имеет полосы пропускания, в которых происходит фазовая инверсия (а). При шаге ПП примерно в 3-4 раза плотнее предела Найквиста (б) уже можно организовать области глубокого подавления для волн с K в 2-4 раза больше, чем в полосе пропускания. В ряде случаев именно так соотносятся кажущиеся скорости полезного сигнала и регулярных помех с осями, параллельными первым вступлениям. При еще большей длине волны «боковое» пропускание очень мало, появляются широкие полосы полного подавления (в). Это особенно полезно при борьбе с низкочастотными помехами. Заметим, что база группы при этом равна не видимой длине волны-помехи, как это рекомендовано для отдельно взятых групп, а $1/2$ этой величины. Если же отказаться от сплошной приемной линии и шаг ПП принять больше базы группы (типичны цифры 50 и 25 м, соответственно), то FK-фильтр оставляет побочные полосы пропускания (г). Так, помехи с

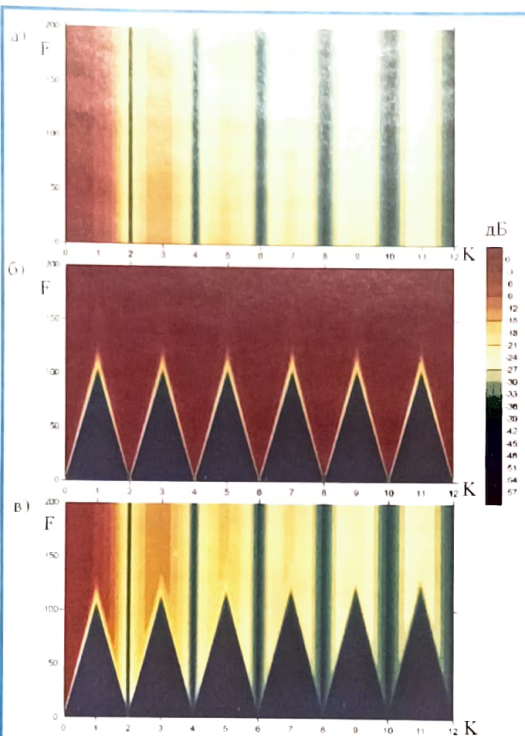


Рис. 14. FK-панели сплошной ЛП для: а) К-спектра группы из 12 геофонов, б) верного FK-фильтра, в) произведение (а) и (б). Здесь $K=1$ – волновое число Найквиста при $\text{шаг группы} = \text{шаг ПП}$.

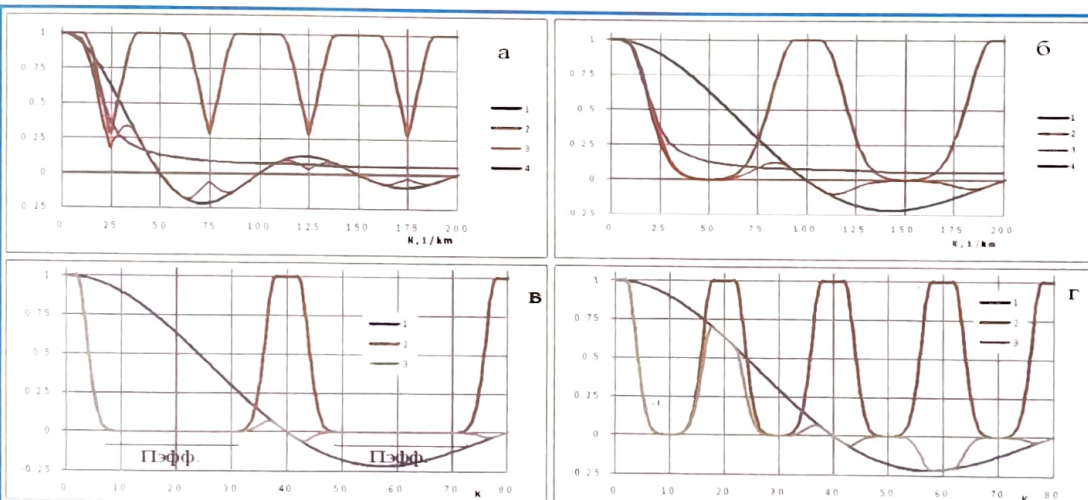


Рис. 15. Сочетание линейного группирования и FK-фильтрации для некоторых фиксированных частот. Характеристики пропускания линейной группы (1) и FK-фильтра (2), их произведение (3), К-спектр полезного сигнала (4). Области Пзфф – К-диапазоны наиболее эффективного подавления. Другие пояснения в тексте.



Рис. 16. Сейсмограмма ОПВ до и после FK-фильтрации. Шаг ПП = база группы = 25 м.

периодом 40-60 м в данном примере практически не подавляются. Только сплошная ЛП обеспечивает эффективное подавление регулярных и вообще любых низкочастотных помех (рис. 16).

Окончательный выбор шага геофонов и базы группы производится с учетом затрат. Затраты на 1 пог.км ЛП включают постоянную компоненту (рубка просек, передвижение транспорта, размотка кабеля) и переменную, зависящую от количества оборудования на пог.км. При увеличении модуля сплошной ЛП уменьшается число электронных блоков (а значит и затраты), но эффективность пространственной фильтрации также падает (рис. 17). Похожая зависимость существует и для шага геофонов. Оптимум определяется через отношение $S/N/\text{затраты}$. Пошаговый расчет стоимости ЛП для разного шага ПП и геофонов в группе и соответствующих FK-характеристик для всего годографа в среднем и для его наибольших наклонов показал, что в условиях Зап.Сибири для частот до 100 Гц оптимальны модули (группы) 20-25 м из 12-16 геофонов.

При работах с групповым источником необходимо согласование К-характеристик источника и ЛП. На рис. 18 приведены интегральные энергетические характеристики линейной системы в полосе подавления для групп из 3 и 4 элементов (общие и отдельно для диапазонов фазовой инверсии, до и после FK-фильтра). Видно, что отношение баз группирования источников и приемников заметно влияет на результат – до 12-15 дБ только с применением FK-фильтра. Суммар-

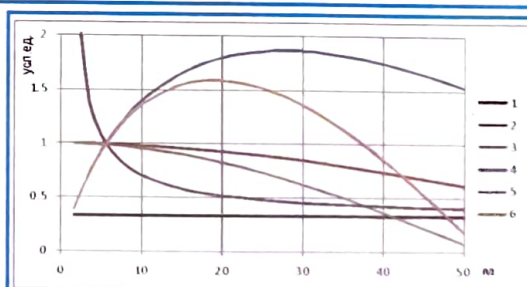


Рис. 17. Зависимость затрат на регистрацию и S/N на частоте Фверх от модульности сплошной ЛП, м. 1 – постоянная компонента затрат на пог.км ЛП, 2 и 3 – S/N соответственно для всей записи и для максимальных удалений ПВ-ПП, 4 – общая сумма затрат, 5 и 6 – отношение соответственно 2 и 3 к 4.

ный эффект от оптимизации базы группы и FK-фильтрации доходит до 20-24 дБ, а общий (включая приемную группу) – до 55 дБ. Оптимальная группа источников на 15-30% длиннее приемной. Это близко к наилучшему соотношению и в полосе пропускания энергии полезного сигнала [7]. Отсюда, если группа геофонов составляет 20-25 м, а типичная длина 1 ПСУ 8-10 м, то целесообразно группирование именно 3 источников.

Итак, применение однотипных FK-представлений позволяет совместно рассматривать, с одной стороны, волновое поле сигнала, регулярных помех и микросейсм, а с другой – геометрию системы наблюдений, включая полевое группирование, как аналоговую K-составляющую более общей двумерной оптимальной фильтрации.

Распределение между аналоговой и цифровой фильтрациями оптимизируется с учетом экономической эффективности.

Оптимизация в x-t пространстве

F-K область является своего рода виртуальным пространством, масштаб которого ограничен самой записью. Пространство x-t исходной записи – чисто физическое, в котором на этапе полевых работ, с одной стороны, нужно получить неискаженную запись с заданной геометрией, а с другой – возможно, так сказать, расширить шкалу этого пространства.

Как следует из описанных свойств поля микросейсм, их основная энергия на частотах свыше 40-50 Гц приходит в точку измерения из ближней зоны, т.е. в «малом» масштабе x-пространства

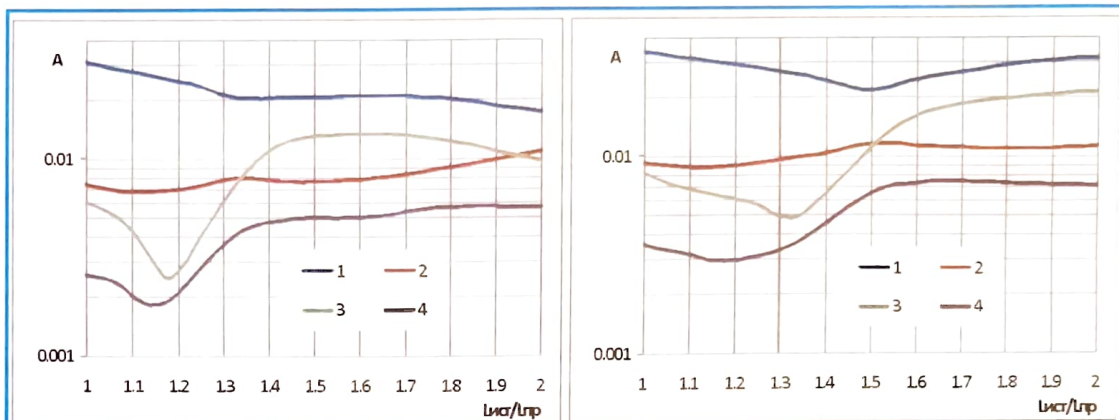


Рис.18. Глубина K-фильтра, A, в зависимости от отношения баз группирования источников и приемников: 1, 2 – без FK-фильтрации, 3, 4 – с FK-фильтрацией; 1 и 3 – по полной энергии, 2 и 4 – по энергии в областях фазовой инверсии. Слева – группа из 4х, справа – из 3х источников.

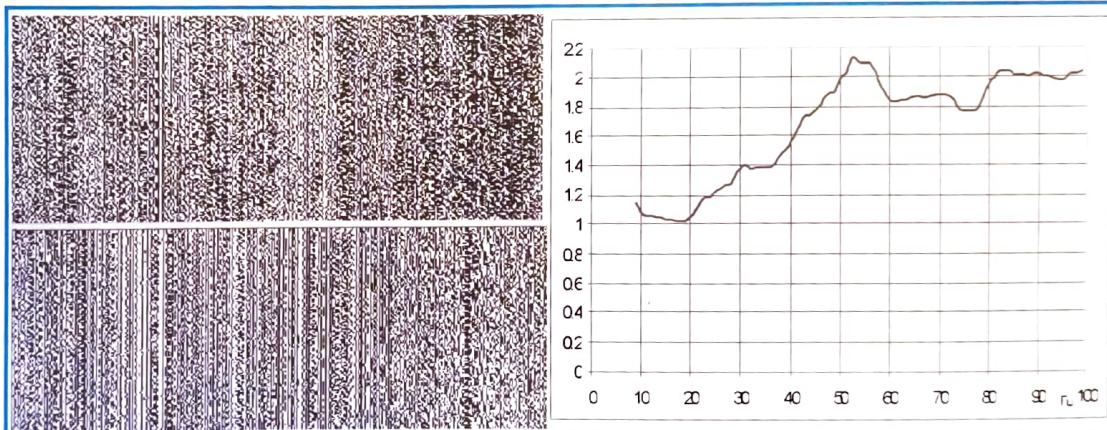


Рис.19. Слева – фрагмент записи микросейсм с геофонами на ненарушенной поверхности (вверху) и с удаленным дерном на площадках 1 дм² под геофоны (внизу). Справа – отношение их спектров.

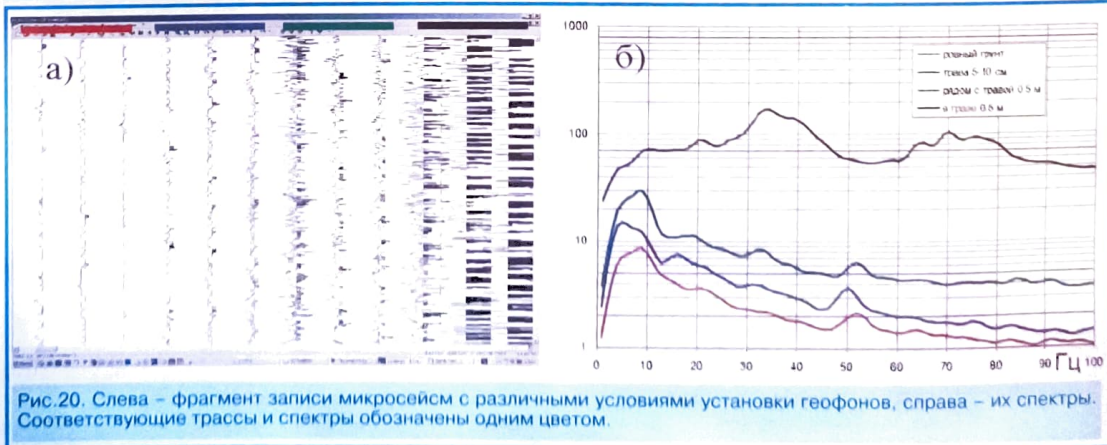


Рис.20. Слева – фрагмент записи микросейсм с различными условиями установки геофонов, справа – их спектры. Соответствующие трассы и спектры обозначены одним цветом.

(меньше, даже иногда геофоны). Влияние способа установки геофонов на уровень шумов незначительно давно [1, 10, 12-14]. В основном, однако, рассматривают качество контакта с грунтом и укрытие геофонов от ветра, иногда даже не упоминая соединительный провод. Относительно малый эффект снижения микросейсм, видимый на открытом канале, может ввести в заблуждение относительно их энергии в правой части спектра.

На рис. 19 приведен пример того, как удаление дерна на площадке 1 дм² под каждый геофон дает эффект снижения микросейсм до 2 раз на частоте 50 Гц и выше (2 ЛП параллельно на одном профиле в полупустыне). Еще интереснее пример на рис. 20, на котором показаны записи и спектры микросейсм при открытой установке геофонов на грунтовой дороге и, для сравнения, на обочине - в низко скошенной траве на расстоянии 1 и 0,1 м от границы травостоя и в высокой траве. В правой части спектра наблюдается увеличение амплитуды в 1,5, 3-4 и 50-60 раз, соответственно. Очевидно, что важно не только укрыть от ветра геофоны вместе с проводами, но и свести к минимуму возбуждение микросейсм в субметровом слое от линии геофонов путем очистки профиля от растительности и т.п. Конструкция и материалы соединительного провода геофонов должны обеспечивать ему минимум резонансных колебаний, по крайней мере, в диапазоне от 40-50 до 150-200 Гц во всех вариантах установки. Практика показала, что введение дополнительных рабочих (2-3 на бригаду) для срезки дерна и/или применение травосилок увеличивает себестоимость работ менее, чем на 1%. То есть по соотношению затрат и результата эти меры намного эффективнее, чем, например, замена 20-тонных вибраторов на 30-тонные или удвоение кратности.

Непостоянство уровня микросейсм позволяет минимизировать их в t-области, но уже в масштабе больше, чем длина записи. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в этой области практически для любой шкалы, начиная от секунд, амплитуда шумов подчиняется распределению Рэлея. То же наблюдается для скорости ветра, с которым амплитуда микросейсм тесно коррелирует. С усилением ветрового воздействия микросейсм быстрее растут на высоких частотах, на которых шум более нестационарен. По данным для Западной Сибири усредненная ФАК значений скорости ветра

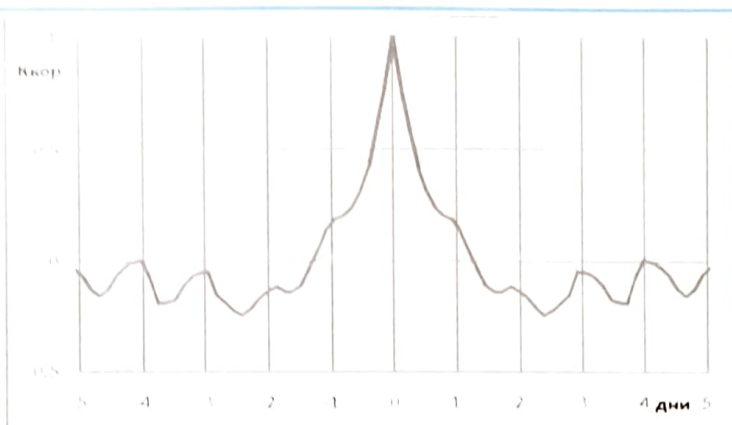


Рис.21. Функция автокорреляции значений скорости ветра по временной шкале.

(рис.21) обнаруживает слабую суточную периодичность (ночью немного тише), но в целом значения скорости ветра с интервалом в сутки являются статистически независимыми величинами с дисперсией 2,5-3 м/с.

Эти свойства микросейсм можно использовать несколькими путями. Во-первых, накопление идентичных воздействий невзрывного источника путем суммирования с весами, обратно пропорциональными энергии трассы в окне взвешивания [9], равносильно смещению распределения в область меньших шумов (рис.22). Величина эффекта зависит от доли энергии шума в сигнале и числа накоплений. Для чисто Рэлеевского распределения с 4-8 накоплениями на ПВ и кратностью 24-72 выигрыш S/N вблизи Фверх на суммотрассе в сравнении с равновесным накоплением составляет до 6-8 дБ. При этом $S(\text{Фверх})/N(\text{Фверх}) \leq 10^{-1}$ на записи одиночного воздействия. Для полноценного использования этого эффекта необходимо весовое суммирование таких записей в сравнительно узких полосах частот.

Во-вторых, адаптивный выбор накопления сигнала с невзрывным источником в зависимости от уровня шума и условий возбуждения. Для производства оптимально, если продолжительность работы на пикете примерно равна переезду и подготовке, т.е. составляет около 50% всего рабочего времени. Чтобы получить это соотношение для всего объема в среднем, нужно непосредственно обеспечить его при уровне шума, близком к максимуму распределения. В примере на рис. 23, при амплитуде шума 5 мкВ и времени на переезд между ПВ 1 мин накопление воздействий тоже должно занимать около 1 мин. Исходя из этого формируется и стандарт качества записи. При изменении уровня микросейсм соответственно меняется длительность накопле-

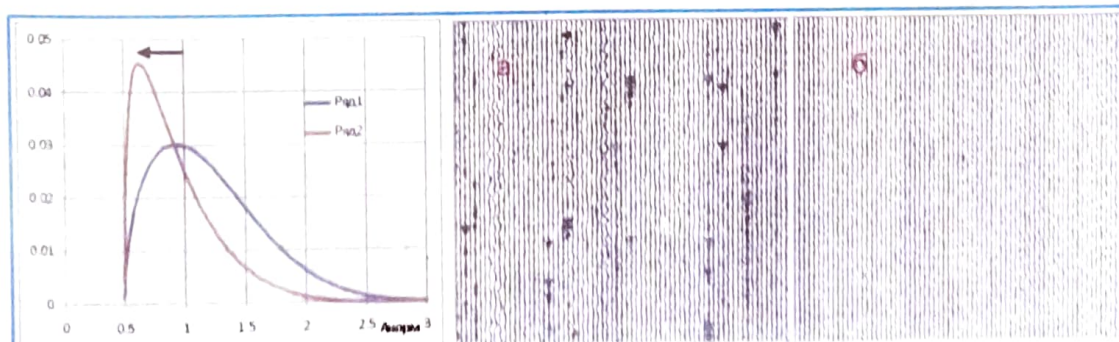


Рис.22. Слева - смещение распределения (снижение среднего шума) при весовом суммировании. Справа - одиночная запись микросейсм (а) и после 4-кратного весового суммирования с удвоенной амплитудой воспроизведения (б).

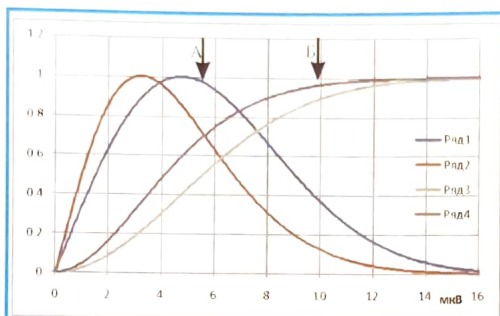


Рис.23. Рэлеевская аппроксимация распределения шумов (1), распределение производительности при адаптивном выборе накоплений с невзрывными источниками (2) и соответствующие интегральные распределения (3) и (4). А – уровень микросейсм, при котором выбирается стандарт с невзрывными и устанавливается порог шума с взрывными источниками, Б – рекомендованный порог шума при работе с невзрывными.

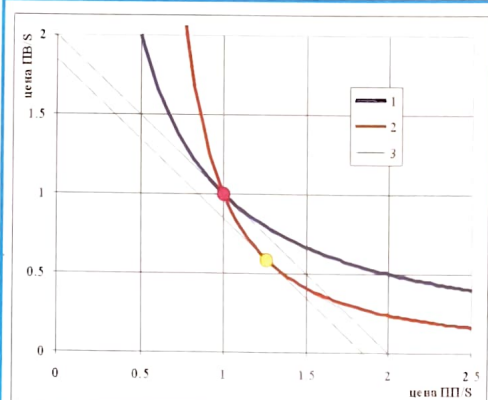


Рис.24. Графики относительных затрат на возбуждение и регистрацию при фиксированной производительности в км² (1) и в количестве ПВ (2) за смену. (3) – линии суммарной стоимости.

ния сигнала, а распределение производительности в зависимости от шумов сдвигается влево. При удвоении уровня шумов производительность падает в 2.5 раза, после чего целесообразно прерывать работу для экономии ресурса техники. При этом простои составят около 10% времени, а увеличение производительности в тихую погоду будет почти двукратное.

Вообще, во взрывной сейсморазведке следует ограничивать работу уровнем шума, до которого приходится примерно половина всего времени (рис.23). Тогда записи будут весьма однородны по шуму. Подготовка скважин при этом идет независимо и ритмично, а регистрация, как правило, производительней, чем бурение. Так что за 1 смену можно отработать ПВ, разбуренные на протяжении 2-3 смен. Т.к. корреляция уровня ветровых помех с суточным интервалом отсутствует, то вероятность простоя подряд 2 смены и более есть произведение вероятностей

однодневного простоя. Так, если запас каналов обеспечивает ритмичную работу сейсморигид в течение 2 смен без отстрела, общая вероятность их простоя сокращается с 0.5 до 0.25. Аналогичным образом, вероятность ускоренной работы невзрывных источников в тихую погоду несколько смен подряд также мала.

Чтобы сгладить такую неравномерность работы, нужен дополнительный запас по производительности сейсморигид (не менее 10% для невзрывных и 30% для взрывных источников) и минимум двухсменный запас каналов на «подмотку». По сравнению с традиционным требованием ритмичной работы, увеличение расходов на регистрацию в этом случае не превышает 30% при той же стоимости возбуждения, а выигрыш в отношении сигнал/помеха минимум 2-кратный.

Особенности комплексной оптимизации параметров систем 3D

Рассмотрим специфический для 3D аспект совместной оптимизации возбуждения и регистрации. Если кратность, бин и контур шаблона заданы, то этим задано значение произведения плотности взрывных и приемных линий (пикетов), которому могут удовлетворять несколько вариантов сети. В то же время, себестоимость 1 км² в основном складывается из суммы произведений плотности ЛВ и ЛП на себестоимость пог.км каждого типа линии. Получаем простейшую систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{ПВ} \cdot N_{ПП} = const \\ N_{ПВ} \cdot C_{ПВ} + N_{ПП} \cdot C_{ПП} = C_{км}^2 \end{cases} \begin{cases} xy = A \\ x + y = B \end{cases}$$

где график равных плотностей – гипербола, график равных стоимостей – прямая (рис.24). Видно, что оптимальны системы с равной себестоимостью возбуждения и регистрации (включая подготовку ЛВ и ЛП). Однако, если производительность в ф.н. ограничена возможностями источников (обычно с невзрывными), то рационально увеличение шага ЛВ на 50-70% с пропорциональным сгущением ЛП. При этом доля возбуждения в себестоимости уменьшается с 1/2 до 1/3, а выигрыш достигается снижением себестоимости 1 пог.км ЛП за счет роста производительности в км². Но поскольку 1 невзрывной ПВ обычно дешевле, чем взрывной, то различия параметров сети, оптимальных для этих типов источников, не столь велики.

Следует учесть, что наилучшие характеристики удалений и азимутов получаются только в том случае, когда облако точек пересечения ЛП и ЛВ достаточно изотропно в плане, что ограничивает выбор пропорций ортогональной сети. Эти рамки могут быть расширены с помощью «наклонных» сетей (рис.25).

Определенная трудность заключается в том, что если затраты на возбуждение и топороботы оцениваются непосредственно, то себестоимость регистрации зависит от производительности

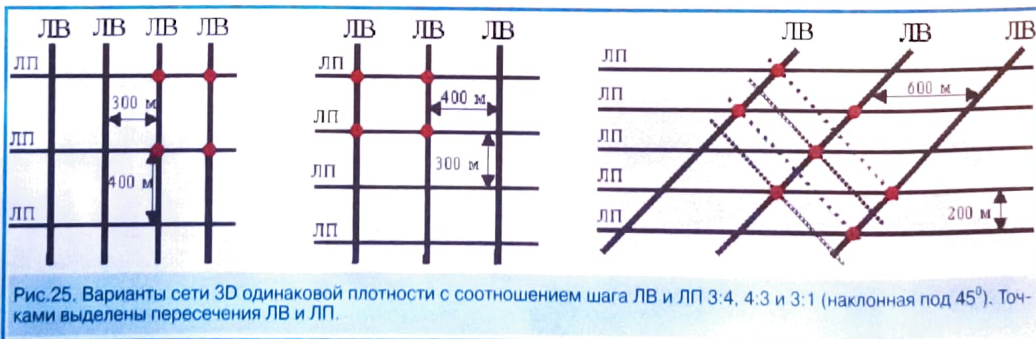


Рис.25. Варианты сети 3D одинаковой плотности с соотношением шага ЛВ и ЛП 3:4, 4:3 и 3:1 (наклонная под 45°). Точками выделены пересечения ЛВ и ЛП.

сти, системы наблюдения, количества каналов и сетевой обмен.

Перекрывание блоков 3D осуществляется так, что интервал возбуждения четно кратен размеру шаблона, начиная с отношения 1/2. Наиболее часто используется схема 1/2, 1/4, 1/n (n – число ЛП). Схема «1/2» наиболее проста и экономична, но неоднородна crossline. Для «1/2» наиболее целесообразно число ЛП $10+4k$, ($k=0, 1, 2, \dots$), для «1/4» – $12+8k$, а для «1/n» – любое четное.

При выборе размеров шаблона часто стараются полностью вписать его в максимальные удаления R. Наибольшей площадью шаблона (значит, и кратность при заданном шаге ЛВ и ЛП) для системы «1/2» получается при аспекте 3/2, но при этом он занимает только 42% круга R (рис.26). Оптимально увеличение шаблона до величины, когда 2 ближних к крайнему ПВ угла вписаны в R при том же аспекте. В итоге кратность повышается на 58%, равномернее азимутальная выборка, а затраты на регистрацию вырастают только на 20-25%. Вообще, для всех схем от «1/2» до «1/n» оптимальны примерно равные максимальные удаления inline и crossline, составляющие 0.9-0.95R.

Стоимость ПП, кроме затрат на подготовку профиля, складывается из амортизации и обслуживания оборудования и зависит от того, как долго оно в среднем находится на пикете и какое его количество перемещается в расчете на единицу отработанной площади. Имея определенное кол-во каналов в партии, нужно максимизировать площадь отстрела, получаемую без переноса этих каналов. Это достигается, если участок отстрела и сменная расстановка, включающая все готовые к работе каналы, подобны (рис.27). При этом подобие исчисляется не метрическими «габаритами», а целым числом линий и интервалов (в данном примере контур отстрела составляет 6 интервалов по 7 ЛВ, а контур всей расстановки – 15 ЛП по 18 интервалов, $6 \cdot 7 \approx 15 \cdot 18$). При несоблюдении подобия производительность падает тем значительнее, чем меньше отношение числа каналов в сменной и активной расстановках. Для систем 1/2, 1/4, 1/n минимальный комплект каналов можно ориентировочно принять 1.5-, 2- и 2.5-кратным, соответственно.

Трудозатраты по переносу каналов, т.н. «перемотке», возрастают с увеличением доли площади на перекрытие полос отработки, где каналы устанавливаются по 2 и более раз (полоса отработки ориентирована по направлению последовательного переноса каналов и необязательно совпадает с блоком системы наблюдения). Суммарная площадь перекрытий снижается, если контур отстрела вытянут поперек полосы отработки сравнительно с вышеуказанными пропорциями. С учетом всех факторов рекомендуется «удлинение» контура отстрела в 1.5-3

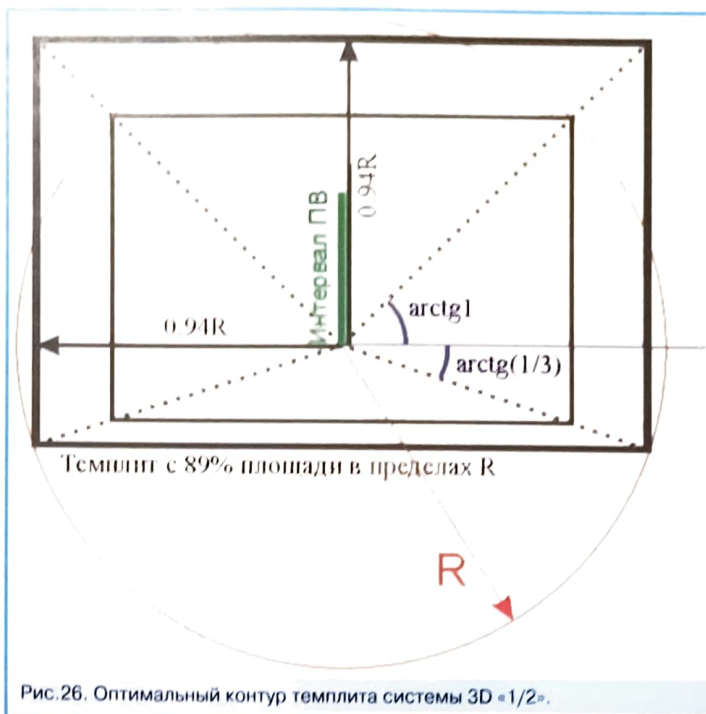


Рис.26. Оптимальный контур темплита системы 3D «1/2».



Рис.27. Пример расстановки 3D типа «1/4», подготовленной к работе. Ее контур и контур отстрела подобны.

раза. В этом диапазоне производится оптимальное разбиение площади на полосы отработки.

Стоимость 1 ПП связана с размерами шаблона и производительностью в км^2 и не зависит от шага ЛП. Учет всех указанных факторов показал, что, за вычетом топоработ, она примерно пропорциональна производительности в степени -2/3 и в условиях Зап.Сибири при оптимальном планировании составляет от 10 до 30 величин суточной амортизации сейсмоканала.

Комплексное применение описанных выше рекомендаций способно при минимальном увеличении затрат обеспечить повышение отношения сигнал/помеха в десятки раз и расширение полосы частот на несколько десятков Гц. На рис.28 сопоставлены разрез 2D, полученный на основе материала типичного качества с шагом ПВ и ПП 50 м, и совмещенный срез куба 3D (сеть 300×400 м, бин 25×50 м), выполненного с учетом приведенных рекомендаций (Ямал). Частотный диапазон составляет 10-60 Гц в первом случае и 5-100 Гц – во втором. Правый разрез характеризуется значительно лучшей кинематической и

МВС: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

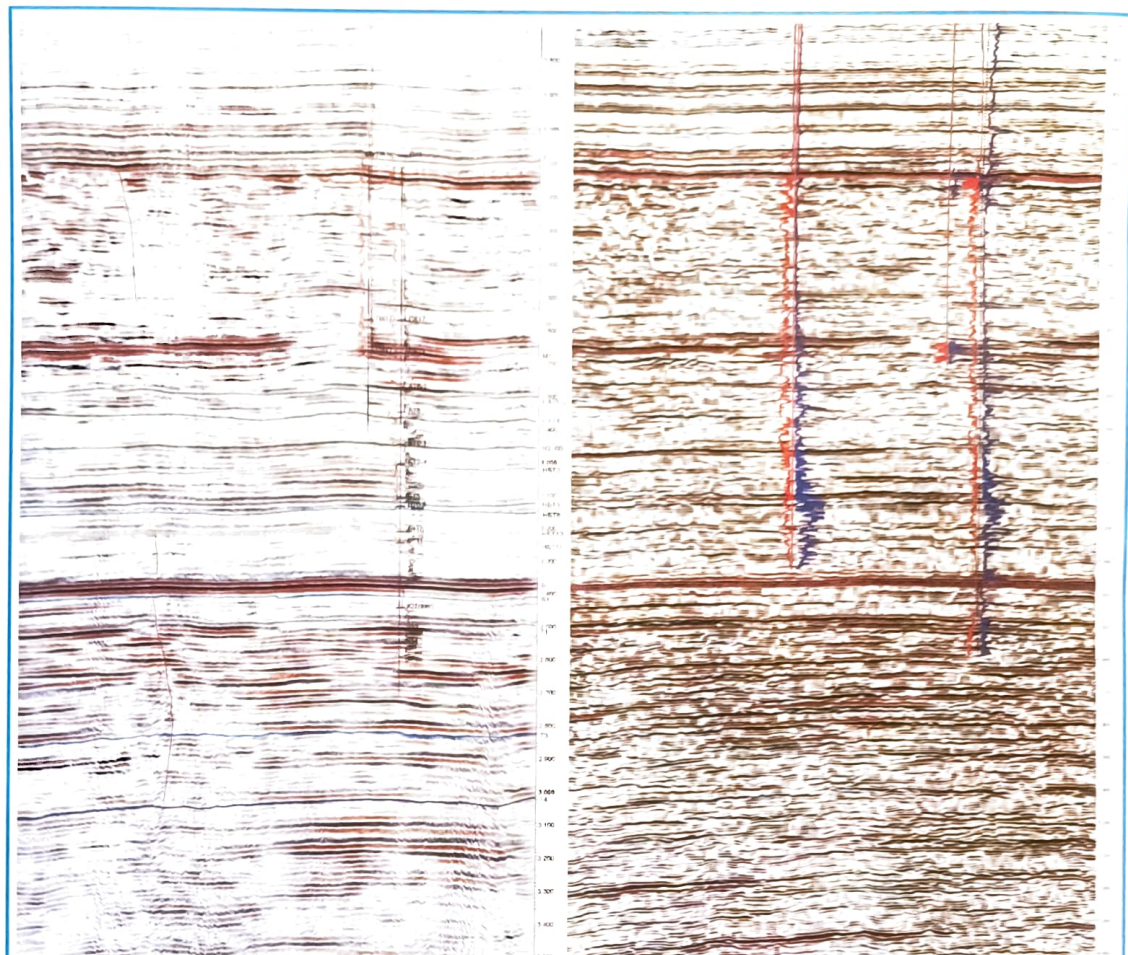


Рис. 28. Сопоставление разреза 2D на основе стандартного полевого материала (слева) и широко-полосного разреза 3D на основе полевого материала, полученного с учетом приведенных рекомендаций.

динамической разрешенностью. Высокое отношение сигнал/помеха обеспечивает уверенное выделение когерентных отражающих площадок, малоамплитудных разломов и динамических аномалий; качество выдержано по латерали. На левом разрезе мы видим падение когерентности там, где сейсмограммы низкого качества получены на участках с увеличенной мощностью ЗМС, морфологически привязанных к зонам глубинных разломов. Последние оказались частично завалуированы «рябью», обусловленной ненадежными стат.поправками и низким отношением сигнал/помеха.

Список литературы.

1. Бембель Р.М. Высокоразрешающая объемная сейсморазведка. Новосибирск, Наука, 1990.
2. Берзон И.С. Сейсморазведка тонкослоистых сред. М., 1976.
3. Винер Н. Кибернетика. М., 1983, 343 с.
4. Гогоненков Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. М., Недра, 1987.
5. Грехов И.О. Прогнозирование условий возбуждения сейсмических волн на основе ландшафтного районирования и анализа механических свойств пород ВЧР. Геофизический вестник ЕАГО, 2001, №10, с.4-8.
6. Грехов И.О. Объектно-ориентированная оптимизация параметров полевых сейсморазведочных работ МОГТ. Конференция Геофизика-2003, СПб. Тез. докл., с.42-46.
7. Грехов И.О. К вопросу о применении линейного группирования при проведении работ МОГТ в Западной Сибири. Геология, геофизика и разра-

ботка нефтяных и газовых месторождений. 2006, №10, с.27-34.

8. Грехов И.О. Методика выбора параметров возбуждения сейсмических колебаний в ОАО «Сибнефтегеофизика». XI конференция «Хантымансийскгеофизики», Ханты-Мансийск, 2008.
9. Грехов И.О., Дроздов А.П. Опыт применения сейсмоисточников «Енисей» в ОАО «Сибнефтегеофизика». Приборы и системы разведочной геофизики, 2005, №2, с.23-25.
10. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. М., Недра, 1980. 551 с.
11. Кондратьев О.К. Разрешающая способность сейсморазведки МОБ-ОГТ. // Геофизика. 2006. №2, с.3-12.
12. Потапов О.А. Технология полевых сейсморазведочных работ. М., Недра, 1987. 309 с.
13. Притчетт У. Получение надежных данных сейсморазведки. М., Мир, 1999. 448 с.
14. Шериф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. М., Мир, 1987.
15. Anstey N.A. Whatever happened to ground roll. // The leading edge, 1986, 5, №12, с.19-21.
16. Jack I. Land seismic technology. Where do we go from here? // First break, 2003, №2.
17. Kerekes A.K. The stack array and the spatial alias. // The leading edge, 1986, 5, 345-348.
18. Kerekes A.K. Seismic array design by spatial convolution. // Geophysics v 66, no 4, p 1195-1207.
19. Kerekes A.K. Seismic field parameters – our neglected science. // The leading edge, 1997 no 1.
20. Tyapkin Y., Robinson E.A., Ewing M., Worzel J.L. How to optimize pilot sweep of vibratory sources in seismic surveys. // First break, 2003, №2.