

где V_k - объем сферы радиуса a_k .

При $\epsilon=0$ погрешность отсутствует. При увеличении ϵ она возрастает сначала медленно, потом все более резко. Например, при $a=50$ и эксцентриситете 0,8 погрешность составляет всего 12,5 %, а при $\frac{\epsilon}{a} \rightarrow 1$ величина δ становится неограниченно большой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелова Н.Г., Забродин В.Ю. и др. Формы геологических тел. - М: Недра, 1977. - 246 с.
2. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований результатов геофизических исследований разрезов скважин. - М: Недра, 1955. - 492с.
3. Дахнов В.Н. Промысловая геофизика. - М: ГНТИ, 1959. - 692 с.
4. Заборовский А.И. Специальные функции для геофизиков-разведчиков. - М.,Л: ГОНТИ, 1939. - 199 с.
5. Интерпретация результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин / Под ред. В.М.Добрынина. - М: Недра, 1988. - 175 с.
6. Козырин А.К., Блинкова Н.В. Теория одноэлектродного каротажа //Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. - 1984 - С. 30-34.
7. Козырин А.К. Одноэлектродный каротаж в пределах горных отводов рудодобывающих предприятий // Горный журнал. - 1985 - № 5 - С. 28-32.
8. Козырин А.К. Электрическая корреляция разрезов скважин. - М: Недра, 1985. - 134 с.
9. Комаров С.Г. Каротаж пластов высокого сопротивления. - М: Гостоптехиздат, 1950. - 280 с.

УДК 550.834

В.И. Бондарев, С.М. Крылатков, С. Г.Сальгрев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОЩАДНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

При разведке сложных геологических объектов (соляные купола, рифы, зоны тектонических нарушений и др.), проведении мониторинга месторождений или детальном их изучении наблюдаются сложные волновые поля с обилием волн, приходящих по разным направлениям к пунктам приема. Расшифровка их и правильная геологическая интерпретация получаемых материалов чрезвычайно затруднены в этих случаях при проведении двумерных наблюдений, что в конечном счете приводит к ненужным затратам на бурение скважин, которые попадают в неоптимальные условия.

Поэтому в последние годы все большее применение находит трехмерная сейсморазведка (3D-сейсморазведка), которая является закономерным развитием ее двумерной модификации (2D). Переход на трехмерную сейсморазведку и площадные системы наблюдений приводит к более полному использованию энергии источников сейсмических колебаний и получению пространственной, а также более надежной информации об изучаемых геологических телах.

Однако, несмотря на расширяющееся использование методов объемной сейсморазведки, до сих пор еще недостаточно разработаны критерии выбора параметров методики трехмерных наблюдений.

Одной из важных характеристик любых сейсмических работ по методу общей глубинной точки является кратность системы наблюдений. В сейсмической литературе чаще всего

ограничиваются указанием, что в общем случае при 3D-работах может быть использована меньшая кратность, чем в 2D. Однако никаких количественных оценок этого явления не дается.

Поэтому целью данной работы как раз и является сравнение эффективности суммирования при 2D и 3D сейсмических исследованиях в зависимости от кратности наблюдений, а также определение некоторых относительных количественных параметров суммарного сигнала.

Для оценки эффективности суммирования при ОГТ используется коэффициент разрушения записи (КРЗ), предложенный в работе [2].

Особенности технологии трехмерной сейсморазведки

В трехмерной сейсморазведке пункты возбуждения и приема располагаются по определенным линиям, профилям. Однако, в отличие от профильных съемок, эти линии или ортогональны, или расположены под некоторым углом друг к другу. Взаимное расположение линий приемников и источников показано на рис.1.

Методика работ 3D основывается на системах наблюдения с многократным прослеживанием границ, которые в принципе аналогичны системам ОГТ (общая глубинная точка) или ОСТ (общая срединная точка). Отличие заключается в том, что приемники принимают волны, распространяющиеся по различным азимутам, и центры наблюдений между пунктами возбуждения и приема становятся распределенными по площади, а не по линии (профилю).

Как известно, при профильных сейсмических работах систему наблюдения определяют такие параметры, как значения минимального и максимального выноса или расстояния от пункта возбуждения до расстановки сейсμοприемников. В 3D-сейсморазведке к этим параметрам добавляется еще азимут направления с каждого приемника на пункты возбуждения упругих колебаний. На рис.2 приведена схема сейсмических работ с различным направлением прихода сейсмических волн в точку приема. Оптимизация этого дополнительного параметра (азимута) оказывает значительное влияние на результаты съемки.

При разведке пологозалегающих структур с субгоризонтальным положением границ раздела распределение азимутов в пределах одной ОСТ особого значения не имеет. В тех же случаях, когда изучаются сложные структуры с большими углами падения слоев, диапазон азимутов должен быть значительным, и от его величины зависит степень освещенности строения наклонных элементов разведываемого объекта.



Рис.1. Схема ортогонального расположения линий приемников и источников колебаний при 3D



Рис.2. Направление прихода отраженных волн в точку приема при 3D-работах

Способы оценки эффективности суммирования при ОГТ в сейсморазведке

Суммирование по ОГТ является реализацией пространственно-временного фильтра или линейной интерференционной системой (ИС). Практическое применение этой системы осуществляется на этапе обработки сейсмической информации. Основной целью такого суммирования является улучшение прослеживаемости полезных волн и подавление (разрушение) волн-помех.

В настоящее время работа ИС нередко анализируется преимущественно на основе результатов расчетов их частотных характеристик (АЧХ) и коэффициента направленного действия (КНД). С этой целью вначале для конкретного типа ИС устанавливается характер зависимости запаздывания волны, приходящей на каждый канал относительно линии суммирования. При этом лишь в некоторых случаях частотная характеристика интерференционной системы может быть вычислена аналитически. В большинстве же важных для практики случаев такое аналитическое вычисление невозможно, поэтому приходится все характеристики рассчитывать численными способами.

Поканальное запаздывание любой волны относительно линии синфазного суммирования можно представить либо в виде линейной, либо в виде криволинейной зависимости. В качестве криволинейной зависимости обычно выбирают параболическую. Особенно это оправдано в методе отраженных волн, поскольку остаточные годографы этих волн (после ввода кинематических поправок) весьма близки по форме к параболе.

Если в качестве основного параметра регистрируемой сейсмической волны взять время максимального запаздывания θ_L волны на базе $L = \Delta x \cdot (N-1)$ интерференционной системы, то, при равномерном расстоянии между сейсмоприемниками ($\Delta x = \text{const}$), поканальную функцию запаздывания для случая параболической зависимости запаздывания от

номера канала n можно представить в виде

$$\theta_n = \left(\frac{n-1}{N-1} \right)^2 \cdot \theta_L \quad (1)$$

Частотная характеристика ИС является комплексной и, как всякая комплексная функция, может быть описана двумя действительными функциями. Одну из них принято называть *амплитудной частотной характеристикой* (АЧХ) ИС. Вторую действительную функцию называют *фазовой частотной характеристикой* (ФЧХ). Ниже приводятся формулы для их вычисления:

$$\text{АЧХ}(\omega) = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N p_n \cdot \cos \omega \theta_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N p_n \cdot \sin \omega \theta_n \right)^2}; \quad (2)$$

$$\text{ФЧХ}(\omega) = -\text{arctg} \frac{\sum_{n=1}^N p_n \cdot \sin \omega \theta_n}{\sum_{n=1}^N p_n \cdot \cos \omega \theta_n}, \quad (3)$$

где p_n - весовые множители сейсмических трасс.

Беспятовым Б.И. [3] для количественного описания работы ИС в импульсном режиме было предложено использовать понятие *коэффициента направленного действия* (КНД). Под этим понятием подразумевается отношение энергии суммарного колебания на выходе системы при заданной линии суммирования к энергии той же волны при ее синфазном суммировании:

$$КНД = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^N p_n \cdot s(t - \theta_n) \right]^2 dt}{\left[\sum_{n=1}^N p_n \right]^2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} [s(t)]^2 dt}, \quad (4)$$

где форма сейсмической волны описывается функцией $s(t)$.

Оба эти критерия (частотная характеристика и КНД) позволяют оценить эффект работы ИС лишь частично.

Нами предлагается использовать для оценки эффективности ИС новый интегральный показатель - *коэффициент разрушения сейсмической записи* (КРЗ), описанный в [2]. Основу исследования составило численное моделирование процесса суммирования волн в интерференционной системе.

При этом были использованы некоторые теоретические сейсмические импульсы.

Минимально-фазовый импульс Берлаге [4]:

$$s(t) = a_0 \cdot t \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin \omega_0 t, \quad (5)$$

где α_0, β - некоторые константы.

Импульс с колоколообразной огибающей Н.Н.Пузырева [4]:

$$s(t) = a_0 \cdot e^{-\beta^2 t^2} \cdot \sin(\omega_0 t + \Phi_0), \quad (6)$$

где α_0, β - некоторые константы.

При $\Phi = \pi/2$ - импульс Н.Н.Пузырева имеет симметричную форму и относится к классу так называемых нуль-фазовых импульсов. Такая форма сигнала наиболее подходит для моделирования отраженных волн, время вступления которых совпадает с центром импульса.

Все известные ранее оценки эффективности работы ИС построены на анализе влияния интерференционных систем на трансформацию частотного спектра сигнала на их выходе. По нашему мнению, такой подход не позволяет объективно решать главную задачу такой оценки, поскольку не дает всестороннюю характеристику эффекта разрушения волн-помех конкретной ИС. Главным критерием оценки эффективности работы ИС мог бы быть критерий, учитывающий интегральное зрительное восприятие интерпретатором эффекта разрушения волны-помехи на временном разрезе или суммотрасе.

Анализируя характер восприятия человеческим глазом формы импульса сейсмической волны на совокупности суммотрас в работе [2], мы делаем вывод о том, что наличие сформированной сейсмической волны на временном разрезе (группе трасс) воспринимается на

основании следующих эмоционально-зрительных критериев:

- энергетического доминирования в локальной области;
- амплитудной выразительности записи;
- типичности видимого частотного спектра записи для конкретных условий наблюдения;
- разрешенности сейсмической записи;
- отсутствия интенсивных случайных искажений записи.

Если эффект воздействия каждого из вышеуказанных факторов оценить некоторым коэффициентом, который увеличивался бы по мере усиления разрушающего действия этого фактора на сейсмическую запись, то предлагаемый коэффициент разрушения сейсмической записи (КРЗ) можно было бы представить в виде произведения пяти коэффициентов:

$$КРЗ = K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4 \cdot K5 \quad (7)$$

Критерием энергетического доминирования или отсутствия доминирования в локальной области временного разреза (сейсмической записи) после работы конкретной ИС является введенный Б.И. Беспятовым коэффициент направленного действия (КНД) системы. Поэтому в качестве первого коэффициента K1 в составе КРЗ нами выбран один из уже известных параметров ИС - параметр КНД.

$$K1 = \frac{1}{\sqrt{КНД}} \quad (8)$$

В качестве второго параметра КРЗ, характеризующего амплитудную разрушаемость сигнала на выходе ИС, нами предлагается взять отношение модулей суммы разностей амплитуд входного и выходного сигналов к сумме амплитуд входного сигнала в заданном временном окне:

$$K2 = \left(\sum_{\Delta t} |S_{вых}(t) - S_{вх}(t)| \right) / \left(\sum_{\Delta t} S_{вх}(t) \right) \quad (9)$$

Приведенная структура этого коэффициента однозначно свидетельствует о том, что данный коэффициент, меняясь в пределах от 0 до 1, тем больше по значению, чем сильнее разрушение сигнала на выходе ИС.

Разрушение частотного состава колебания на выходе ИС безусловно приводит к ухудшению восприятия сейсмического импульса на временной трассе как регулярного колебания. Мерой оценки такого разрушения нами выбрана величина

$$K3 = \left(\sum_{\Delta \omega} [S_{вых}(\omega) - S_{вх}(\omega)]^2 \right) / \left(\sum_{\Delta \omega} (S_{вх}(\omega))^2 \right) \quad (10)$$

Этот параметр отражает влияние амплитудной частотной характеристики ИС на структуру сейсмического сигнала на выходе системы. Простота его конструкции открывает широкие возможности при моделировании.

Для того, чтобы конкретный фрагмент сейсмической записи можно было отождествить с регулярной волной, необходимо, чтобы эта волна обладала определенной достаточно высокой разрешенностью. Как известно [1], под разрешенностью сейсмической записи понимают некоторую величину λ , характеризующую возможность разделения сигналов от близко расположенных границ и зависящую от длительности сигнала, его структуры и от величины

отношения сигнал/помеха:

$$\lambda = \frac{a_m^2}{\int_T q^2(t) dt} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\eta}}, \quad (11)$$

где a_m - максимальная амплитуда сигнала; $q(t)$ - сигнал; η - энергетическое соотношение сигнал/помеха.

Для практических задач имеет смысл не абсолютная величина λ , а величина, относящаяся к некоторому эталону записи. Поэтому в качестве еще одной компоненты КРЗ нами принято отношение коэффициентов λ на выходе и входе ИС:

$$K4 = \frac{\lambda_{\text{вых. сигнала}}}{\lambda_{\text{вх. сигнала}}}. \quad (12)$$

Ухудшение разрешенности записи в [2] рассматривается как фактор, усиливающий разрушение сейсмического сигнала и, следовательно, приводящий к увеличению общего значения КРЗ.

Ослабление интенсивных случайных помех на выходе ИС, как известно, пропорционально величине меры статистического эффекта интерференционной системы:

$$K5 = r = \left(\sum_1^N p_n \right) / \sqrt{\sum_1^N (p_n)^2}. \quad (13)$$

Следовательно, для того, чтобы учесть разрушающий эффект этого фактора для данной ИС, необходимо в состав конструируемого коэффициента КРЗ ввести данный множитель.

Предложенная конструкция коэффициента разрушения сейсмической записи учитывает в той или иной мере все факторы, влияющие на ослабление сигнала на выходе ИС. Поэтому данный коэффициент можно принимать за некоторую количественную (эвристическую) меру оценки степени разрушения сейсмического сигнала с точки зрения эмоционально-зрительного восприятия сейсмической записи.

В монографии [2] нами показывается, что введенный новый показатель оценки эффективности работы интерференционных систем - коэффициент разрушения сейсмической записи - позволяет максимально всесторонне охарактеризовать работу системы по ослаблению волн-помех. На основе анализа величины КРЗ можно объективно оценивать влияние любого из параметров ИС на конечный результат работы системы. Это позволяет более объективно и всесторонне понять характер работы ИС и на основе этого осуществлять на стадии проектирования работ разумный выбор параметров конкретной системы.

К сожалению, в [2] эти выводы проиллюстрированы лишь на примере профильных (двухмерных) наблюдений.

В данной работе авторы попытались применять КРЗ для оценивания эффективности и таких сложных систем наблюдений, как 3D-системы в сейсморазведке.

Использование КРЗ для оценки эффективности трехмерных систем наблюдений

Для получения оценки сравнительной эффективности площадных систем наблюдений нами выполнялось численное моделирование, которое состояло из нескольких этапов:

а) выбор сейсмической модели среды;

- б) расчет для выбранных моделей поверхностных годографов ОГТ;
 в) моделирование трехмерных наблюдений и расчет коэффициентов разрушения записи (КРЗ) путем выбора сети профилей со случайно ориентированными азимутами, проходящих через фиксированный приемник;
 г) сравнение с помощью КРЗ средней эффективности по такому набору случайно ориентированных профилей (так моделируются трехмерные сейсмические исследования) с эффективностью работ 2D (в худшем варианте, когда 2D-профиль направлен по простиранию изучаемой структуры).

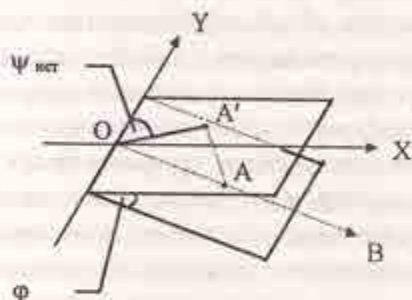


Рис.3. Схема положения границы в пространстве

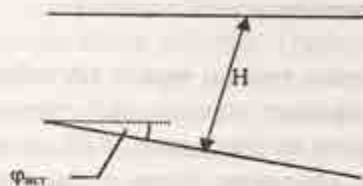


Рис.4. Положение границы в разрезе

Для численного моделирования была выбрана достаточно типичная и вместе с тем сравнительно простая сейсмическая модель среды, представляющая собой однородный сейсмический слой, лежащий на полупространстве и ограниченный сверху плоской дневной поверхностью, а снизу - плоской наклонной границей. Нами использовались сейсмические модели среды, различающиеся следующими параметрами: азимутом падения отражающей границы ($\Psi_{исг}$) (рис.3); углом падения границы ($\varphi_{исг}$); расстоянием от дневной поверхности до ОГТ на границе (H) (рис.4) и скоростью сейсмических волн в слое (V).

Поверхностные годографы ОГТ рассчитывались по известным формулам [5]:

$$T(L) = \sqrt{\left(\frac{2H}{V}\right)^2 + \frac{L^2 \left[1 - \sin^2 \varphi_{исг} \cdot \cos^2 (\Psi_{пр} - \Psi_{исг})\right]}{V^2}}, \quad (14)$$

где $T(L)$ - время прихода отраженной волны, с; H - глубина до границы, м; V - скорость отраженных волн в среде, м/с; L - расстояние источник - приемник, м; $\varphi_{исг}$ - угол падения границы; $\Psi_{исг}$ - азимут падения границы; $\Psi_{пр}$ - азимут профиля. Диапазон азимутов профилей составлял от 0 до 360°.

Для получения синтетических сейсмограмм выполнялась операция свертки годографа с сигналом выбранного вида (5 или 6).

Для сравнительной оценки эффективности суммирования при выполнении расчетов моделировалась также кратная волна с фиксированным запаздыванием времени прихода на базе наблюдений.

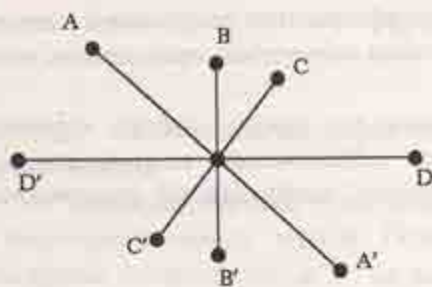


Рис. 5. Схема обработки ОГТ при трехмерных наблюдениях.

сейсмических границ может случайно оказаться, что сейсмические профили будут располагаться по простиранию отражающей границы, но равновероятна и ситуация, когда профиль и линия простирания не совпадают. КРЗ, соответствующий различным взаимным положениям профиля и линии простирания, будет также различен, это означает, что качество получаемых суммотрасс будет зависеть от выбранной ориентировки профиля.

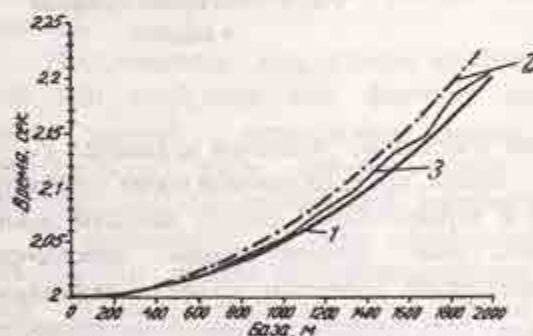


Рис. 6. Принятая в работе схема суммирования:

- 1 – азимут профиля по падению границы;
- 2 – азимут профиля по простиранию границы;
- 3 – линия суммирования

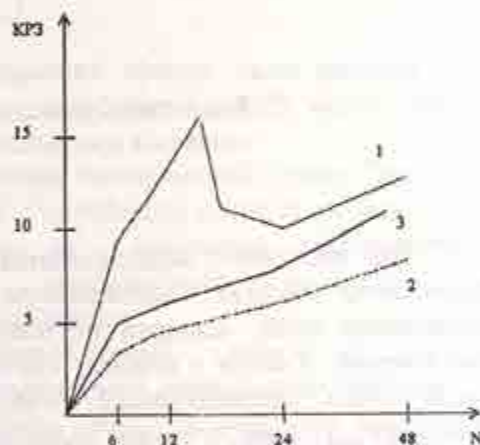


Рис. 7. Зависимость эффективности суммирования, оцениваемой по коэффициенту разрушения записи (КРЗ), от кратности системы наблюдений N при профильных наблюдениях вкrest простирания структуры – 1, вдоль простирания – 2 и для трехмерной системы наблюдений – 3

Поэтому мы прежде всего сравнивали между собой эффективность суммирования ОГТ одинаковой кратности при наилучшем (профиль ориентирован вкrest простирания границы) и наихудшем (профиль ориентирован по простиранию) расположении профиля по отношению к изучаемой структуре. Сейсмограмму же ОГТ, отработанную по площадной системе, можно представить как набор профильных измерений, выполненных при различных случайных значениях азимутов линий источник-приемник. Поэтому для оценки эффективности суммирования

по ОГТ при 3D-исследованиях нами выполнялось суммирование трасс случайным образом по всему возможному диапазону азимутов с той же кратностью, что и при профильных работах. Представление о схеме такого суммирования дано на рис.6. Для большей достоверности оценки качества такого суммирования генерировалось несколько последовательностей случайных значений азимутов (реализаций). Далее рассчитывался средний по всем реализациям коэффициент КРЗ. Вычисления проводились для различных комбинаций физических параметров среды и для типичных значений кратностей 6, 12, 24, 48 и 96.

Число реализаций составляло от 25 до 100 и определялось тем условием, чтобы при дальнейшем росте числа реализаций средняя эффективность случайного суммирования (КРЗ) практически не менялась. Расчеты показали также, что значения определяемых при этом коэффициентов разрушения мало зависят от вида теоретического импульса.

Анализ результатов не позволяет с уверенностью утверждать, что при трехмерных измерениях можно допускать меньшую кратность, чем при профильных работах. Однако при 3D сейсмических исследованиях, проводимых с кратностями выше 24 и при достаточно больших (больше 12°) углах наклона отражающей границы, такое утверждение является обоснованным. Например, можно показать, что средний коэффициент разрушения записи для трехмерных 24-кратных наблюдений по значению может соответствовать КРЗ для худшего возможного варианта профильных измерений, выполненных при кратности около 40 (рис.7).

Выводы

По результатам выполненного численного моделирования процесса получения временных разрезов при 3D работах МОГТ можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный ранее [2] коэффициент разрушения записи (КРЗ) при оценке качества получаемых суммарных трасс применим как при профильных, так и при трехмерных системах наблюдений в сейморазведке.
2. Значительный выигрыш в эффективной кратности сейсмических работ за счет применения трехмерных систем наблюдений имеет место только при кратностях порядка 24 и выше. При кратностях, меньших 24, говорить о заметном преимуществе трехмерных систем наблюдений нецелесообразно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. - М.: Недра, 1980. - 551 с.
2. Бондарев В.И., Крылатков С.М. Исследование эффективности интерференционных систем приема в сейморазведке. - Екатеринбург: Изд-во УГГА, 1998. - 116 с.
3. Гурвич И.И., Беспятов Б. И. Некоторые вопросы теории группирования в сейморазведке // Прикладная геофизика. - 1960. - Вып. 25. - С.20-36.
4. Сейморазведка: Справочник геофизика / Под ред. И. И. Гурвича и В. П. Номоконова. Том IV. - М.: Недра. - 1966.
5. Шнейерсон М.Б., Жуков А.П. Системы наблюдений в трехмерной сейморазведке // Разведочная геофизика: Обзор АОЗТ «Геоинформмарк». - 1996.