

Методика азимутального кинематического и динамического анализа данных МОГТ 3D

Белоусов А.В., Башкардин В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва

Сейсморазведочные работы 3D предоставляют для анализа обширный материал о каждой точке изучаемой среды. Традиционный подход к оценке параметров подразумевает осреднение большого объема данных и получение оценок лишь части параметров. При этом часто не учитываются истинно трехмерные (азимутально-зависимые) характеристики сейсмической записи. Предлагаемая методика позволяет оценить локальные характеристики волнового поля и получить уточняющие значения скоростей сейсмических волн и параметров поглощения по исходным сейсмограммам ОСТ. Подобного рода анализ может проводиться в рамках графа стандартной обработки сейсмических данных. Результирующие значения позволяют оптимизировать операторы суммирования и определить наличие и характер азимутальной анизотропии в среде.

Кинематический анализ

Проведение азимутального скоростного анализа позволяет ввести понятие скоростей в среде по направлению $v(\theta)$, построить азимутальные индикатрисы скоростей и таким образом уточнить геологическую модель, тип и характер анизотропии в горных породах.

Теоретические основы методики азимутального скоростного анализа способом параметрических диаграмм (СПД; КПД - для кинематических параметров) были предложены проф. А.К. Уруповым в 60-х годах XX века для 2D-данных [3]. Данную методику можно обобщить на случай трехмерных наблюдений и стандартно используемых систем наблюдений (ортогональная, зигзаг, кирпич и т.п.).

Учитывая преобладающий объем сейсморазведочных работ методом ОГТ, можно представить следующую последовательность анализа.

- Формирование подборки ОСТ, обладающие максимально широкими и равномерными спектрами азимутов и удалений. Так как вид таких подборок не зависит от методики обработки площади, а зависит лишь от вида системы наблюдений, можно составить обобщенные диаграммы распределений искомых параметров для разных видов систем с целью оптимального выбора трасс на этом этапе.

- Выбор размера сектора азимутального анализа и последовательности анализа по секторам. По сформированным подборкам среднего азимута строятся вертикальные спектры скоростей и определяются значения эффективных скоростей ($v_{ост}(\theta)$).

- Обобщение данных по секторам, построение индикатрис $v_{ост}$ для заданного события ($t_0 = \text{const}$). По форме полученных индикатрис оценивается характер азимутальной анизотропии в среде. Азимутальная индикатриса ОСТ имеет вид эллипса [1]

$$v_{ост}(\theta) = \frac{v_{ef}}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_{ef} \cos^2(\theta - \psi_{ef})}}$$

Где θ - азимут наблюдений; φ_{ef} - эффективный угол наклона границы; ψ_{ef} - эффективный азимут

простираения границы, v_{ef} - эффективная скорость.

- Исключение влияния угла наклона. Кинематический анализ в значительной мере подвержен влиянию углов наклона горизонтов, что следует из уравнения индикатрисы. Эффекты анизотропии и угла наклона в общем случае накладываются друг на друга, поэтому для исключения влияния угла наклона возможно использование результатов структурных построений по данным стандартной обработки.

- Пересчет эффективных скоростей в предельные эффективные и определение интервальных скоростей по формуле Урупова - Диска для среды с плоскими несогласно залегающими границами [1,2]

$$v_{nt} = K \cdot \sqrt{\frac{\Delta(v_{ef}^2 t_0)}{\Delta t_0}}$$

Где: Δ означает разность параметров кровли и подошвы пласта (интервала), K - коэффициент, учитывающий углы падения и простираения и определяемый по формуле

$$K^{-1} = \sqrt{1 - \sin^2\left(\frac{\varphi_{K1} + \varphi_{K2}}{2}\right) \cos^2\left(\theta - \frac{\varphi_{K1} + \varphi_{K2}}{2}\right)}$$

- Анализ полученных кинематических параметров и атрибутов волнового поля для получения дополнительной информации о физических свойствах среды.

Пример анализа кинематических параметров и атрибутов для реальных данных

Для иллюстрации приведенных выше положений, а также оценки эффективности методики в целом, был выполнен азимутальный кинематический анализ по одной из площадей Западной Сибири, отработанной по методике трехмерных наблюдений с кратностью прослеживания 24 и следующими параметрами системы: шаг ЛППВ = 400 м, шаг ЛПП = 300 м, Δ ПВ = Δ ПП = 50 м, расстановка центрально-симметричная, 6 линий по 96 каналов. Исходные данные осложнены статическими эффектами, обусловленными влиянием, главным образом, верхней части разреза, поэтому предобработка включала в себя итеративную коррекцию статических поправок. Стандартно регистрируемый диапазон удалений, соответствующих трассам с относительно устойчивой формой сигнала - $l = 0 \div 3000$ м.

Низкая кратность наблюдений приводит к необходимости выбора достаточно большого размера сектора анализа, в данном случае 30° . Для азимутального анализа требуется минимально порядка 600 трасс (условие наличия информации по разным удалениям в каждом секторе), что соответствует площади 5×5 бинов для кратности наблюдений 24. Некоторое ослабление эффектов такого осреднения достигается проведением независимых азимутальных анализов по секторам, перекрывающимся на 15° , с последующим совмещением результатов на единой индикатрисе.

На рис. 1 представлены полученные индикатрисы азимутальных скоростей ОСТ для разных значений t_0 (значения соответствуют

временам регистрации основных отражающих горизонтов). Следует отметить унаследованный характер индикатрис при переходе от более старых пород к более молодым; на больших временах индикатрисы дополнительно осложнены азимутальной анизотропией, выражающейся в побочных максимумах для секторов со средними значениями θ (-30°) и ($+120^\circ$).

По индикатрисам ОСТ были построены индикатрисы интервальных скоростей (интервалы соответствуют толстослойной модели среды). Результаты построения хорошо согласуются с результатами промышленной обработки данных, в то же время позволяя уточнить кинематические параметры по различным азимутам.

Результаты анализа могут использоваться при интерпретации скоростных характеристик среды, процедура анализа при этом органично включается в стандартный граф обработки.

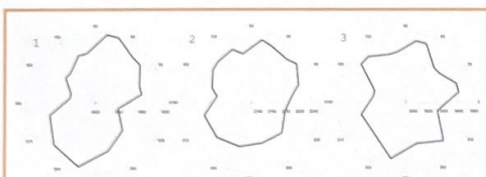


Рис. 1. Индикатрисы скоростей суммирования для различных времен t_0 : (1) $t_0 = 750$ мс; (2) $t_0 = 1600$ мс; (3) $t_0 = 2225$ мс.

Динамический анализ

Стандартный подход к обработке сейсмических данных оперирует, прежде всего, кинематическими характеристиками исходных записей, ограничиваясь необходимым минимумом динамических параметров, либо не используя их вообще. Однако динамические характеристики сейсмических записей могут предоставить ценную вспомогательную информацию необходимую для создания более точного представления о строении изучаемых недр.

Рассмотрим горизонтально-слоистую среду, состоящую из M слоев, в которой

$$V = V_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\sum V_i^2 \Delta t}{\sum \Delta t}}$$

Амплитуду регистрируемых отражений от границ слоев можно описать следующим образом:

$$U[t(l)] = U(t_0, l) = a_0 \frac{D(t)}{Q(t)} F(t) B(t) * f_0(t), \quad (1)$$

где

$$D(t) = \prod_{m=1}^M (1 - R_m)(1 + R_m) R_m = e^{-\eta t}$$

- отражение от M -ой границы и прохождение через все вышележащие границы раздела слоев, R_m коэффициент отражения для m -ой границы при нормальном падении;

$$F(t) = e^{-\alpha t} \quad \text{- поглощение в среде;}$$

$$B(t) = e^{-\beta t} \quad \text{- рассеяние в среде;}$$

$$\frac{1}{Q(t)} = \frac{V_1}{V^2 t} = e^{-\gamma t} \quad \text{- расхождение,}$$

V_1 - скорость в первом слое, $f_0(t)$ -импульс единичной амплитуды.

Изменение амплитуд со временем будет

являться экспоненциальной функцией и, используя разложение в ряд этой функции, можем записать:

$$U(t) = a_0 e^{-\xi t} = a_0 (1 - \xi t + \frac{1}{2!} \xi^2 t^2 - \dots), \quad (2)$$

где $\xi = \alpha + \beta + \eta + \gamma$ - обобщенный параметр затухания, включающий в себя все вышеописанные динамические эффекты: расхождение, поглощение, рассеяние, прохождение и отражение.

Воспользуемся следующей оценкой изменения амплитуд с удалением для конкретного времени t_0 на нулевом удалении [1]:

$$b(t_0) = \int_{l_0}^{l_1} U(t) p(l) dl \approx \sum U_i p_i,$$

$$c(t_0) = \int_{l_0}^{l_1} U(t) s(l) dl \approx \sum U_i s_i,$$

$$K(t_0) = \frac{b(t_0)}{c(t_0)} = \frac{\sum U_i p_i}{\sum U_i s_i},$$

$$t = t_0 \sqrt{1 + \frac{l^2}{t_0^2 V^2}}; \quad t_0 + \frac{l^2}{2V^2 t_0}, \quad t^2 = t_0^2 + \frac{l^2}{V^2},$$

$$\int_{l_0}^{l_1} p(l) dl = 0, \quad s(l) = |p(l)|.$$

Используя (1) в выражении для $K(f_0)$ и ограничившись двумя членами в ряде экспоненциальной функции (квадратичная аппроксимация) с учетом $V = V_{\text{ср}}$, приходим к квадратному уравнению относительно ξ следующего вида:

$$\left[(V^2 t_0^2 + \frac{M^2}{2}) K - \frac{A^2}{2} \right] \xi^2 - \left[(V_0 D + \frac{M^2}{2V_0}) - \frac{A^2}{2V_0} \right] \xi + KD = 0 \quad (3)$$

$$A^2 = \sum l_i^2 p_i, \quad M^2 = \sum l_i^2 s_i, \quad D = \sum s_i.$$

Подготовка данных

Рассмотрим некоторые особенности подготовки данных для вычисления предложенной динамической характеристики, а также ограничения, накладываемые данными, полученными в реальных условиях.

- Сейсмические трассы в пределах конкретных полевых записей ОПВ характеризуются высокой степенью когерентности уровня амплитуд полезных отражений. При приемлемом соотношении сигнал/помеха изменение амплитуд вдоль осей синфазности в пределах сейсмограммы ОПВ хорошо прослеживается и коррелируется. При пересортировке трасс для получения подборки ОСТ соседними оказываются трассы, относящиеся к разным пунктам взрыва. Если энергия источника в этих пунктах была различной, то амплитудный уровень одного и того же отражения на соседних трассах ОСТ может заметно отличаться, создавая ложные локальные амплитудные аномалии.

- Предложенный алгоритм расчета согласно (1) оперирует записями $U(t_0)\xi$, в пределах которых полезные отражения имеют горизонтальные оси синфазности, т.е. подразумевает ввод кинематических поправок. Операция коррекции кинематического сдвига приводит к смещению отсчетов трасс в сторону меньшего времени в зависимости от удаления и заданной скорости ОСТ. Смещение



ТЕЛЕМЕТРИЯ СЕГОДНЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ

отсчетов в соответствии с растущей функцией $V_{ост}$ приводит к различному сдвигу разных временных отсчетов трассы одного фиксированного удаления, что приводит к растяжению и искажению формы сигнала.

- Ввод кинематических поправок также приводит к появлению искаженной неинформативной части сигнала на малых временах и большей части удалений для этих времен, что необходимо учитывать при суммировании по осям $t_0 = \text{const}$.

- Реальные системы наблюдений могут определять неравномерный спектр удалений для ОСТ. Для наиболее точного расчета динамических характеристик предпочтительно наиболее полное и равномерное распределение удалений.

- Остаточные статические сдвиги трасс, а также локальные кинематические эффекты, влияющие на гиперболичность додографа ОСТ, также могут приводить к смещению отдельных отражений относительно горизонтальных осей.

Перечисленные выше особенности реальных данных связаны с различными эффектами неравномерности. Достаточно эффективным способом их преодоления и нивелирования является формирование суперподборок, когда при расчете и анализе предложенных параметров для некоторой фиксированной точки берутся все трассы, находящиеся в пределах заданного радиуса от этой точки. Таким образом, перед подачей исходных данных на вход процедур вычисления обобщенного параметра затухания и его азимутальных зависимостей они должны пройти предварительную обработку, которая состоит из:

- формирования суперподборок с относительно полным и равномерным набором азимутов и удалений, при этом из трасс с очень близким значением удаления целесообразно часть исключить;
- деконволюции (опционально);
- ввода априорных статических поправок;
- ввода кинематических поправок;
- ввода дополнительных статических поправок.

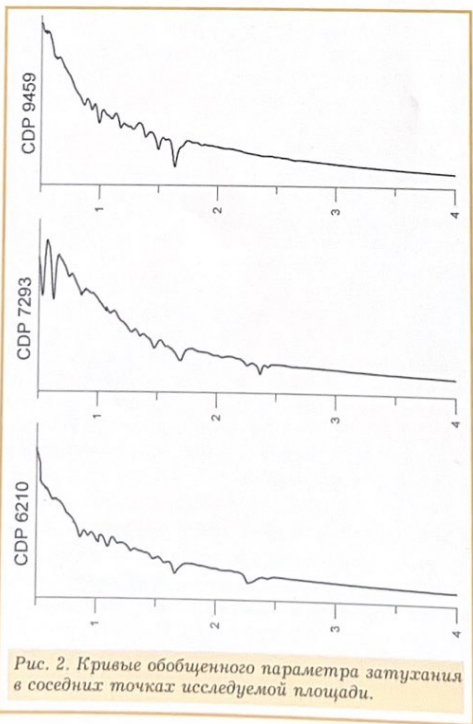


Рис. 2. Кривые обобщенного параметра затухания в соседних точках исследуемой площади.

Коррекции амплитуд за сферическое расхождение не требуется. Для ввода кинематических и статических поправок следует брать результаты обработки по стандартному графу для второй или третьей итерации уточнения. При суммировании вдоль осей $t_0 = \text{const}$ для устойчивости расчетных значений от точки к точке целесообразно оперировать абсолютными значениями амплитуд сейсмических трасс, вычислять их среднеквадратическое значение в достаточно малом временном окне, а также сглаживать кубическими сплайнами характеристику изменения амплитуд с удалением K/t_0 .

Для расчета азимутальных зависимостей необходимо произвести выборку трасс ограниченного диапазона значения азимута из полученной суперподборки. Границы диапазона выбираются таким образом, чтобы производная азимутальная подборка содержала по возможности равномерный набор удалений.

Пример анализа динамических параметров и атрибутов для реальных данных

Для расчета обобщенного параметра затухания были использованы данные одной из площадей Западной Сибири. Кривые параметра обобщенного затухания, вычисленные по суперподборкам, сформированным в нескольких соседних точках площади, представлены на рис. 2.

В сформированных подборках максимальное удаление не превышало 3000 м. Далее из них были получены азимутальные подборки шириной 30° и шагом 15° , по которым в соответствии с предложенной методикой был рассчитан параметр ξ . На основе полученных значений для основных опорных горизонтов, используемых при традиционной обработке и интерпретации в данном районе, были построены азимутальные диаграммы обобщенного параметра затухания. Для целей интерпретации кинематические и динамические диаграммы были совмещены (рис. 3).

Ограничения методики

Рассмотрим сравнительные характеристики модельных и реальных данных по ряду параметров и ограничения, накладываемые реальными данными на возможности анализа.

- **Тип подборки:** реальные данные всегда представлены подборками ОСТ, в то время как для восстановления модели требуются подборки ОГТ (ОТО).

- **Распределение азимутов:** реальные данные представлены неравномерным, зависящим существенно от геометрии системы наблюдений распределением, при этом сгущение данных происходит в направлении inline, для восстановления модели требуется провести по-секторное суммирование, возможно, с привлечением некоторых весовых функций для получения относительно равномерного распределения по бинам.

- **Распределение удалений:** в зависимости от типа системы наблюдений, удаления могут быть распределены относительно равномерно в пространстве t^2 .

- **Количество секторов анализа** в случае реальных данных ограничено количеством трасс в азимутальном секторе, содержащем наименьшее число трасс.

- **Тип анализа секторов:** выбор азимутального сектора $\Delta\theta$ и методики перебора секторов (без перекрытия, с частичным/половинным перекрытием).

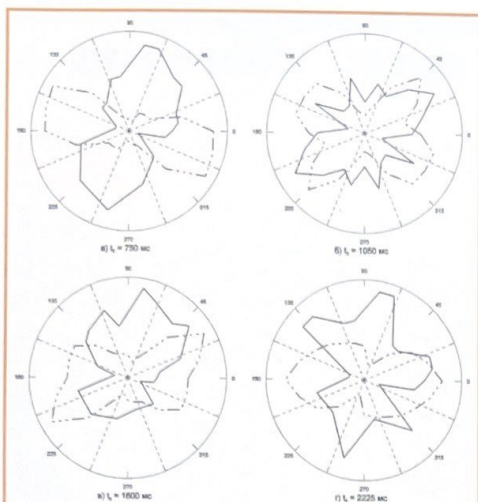


Рис. 3. Совмещенные азимутальные динамические (пунктирная линия) и кинематические (сплошная линия) диаграммы для четырех основных отражающих горизонтов в одной из точек площади.

Помимо соображений, приведенных выше, реальные данные в значительной мере осложнены статическими эффектами и влиянием ВЧР, а также условий возбуждения и приема.

Равномерное распределение азимутов и удалений, достигаемое в модельных данных интерполяцией трасс, на реальных данных недостижимо. Единственно приемлемый путь к ослаблению эффектов неравномерности - формирование суперподборок - при вовлечении в анализ всех трасс, находящихся в пределах некоторого радиуса R от точки анализа. Выбор R определяется типом системы наблюдений, кратностью и условием локальности получаемой оценки; минимальное значение R должно формировать в каждом секторе репрезентативные выборки трасс для проведения анализа. Для ортогональных систем наблюдений при бине 25×25 м R может принимать значения от 25 до 100 м в зависимости от кратности наблюдений. Системам с более равномерным распределением удалений (зигзаг, круговая) соответствуют меньшие значения R .

Возможно, что перебор значений R в зависимости от целевого горизонта анализа приведет к улучшению качества анализа, в то же время существенно возрастают затраты на интерактивную обработку.

Еще один немаловажный аспект подготовки данных - формирование максимально равномерных по удалениям подборок в каждом секторе за счет исключения части трасс на участках с близкими значениями удалений.

Следовательно, любые реальные данные, подаваемые на вход азимутально-зависимых процедур, должны пройти предварительную предобработку, основные этапы которой нацелены на устранение неравномерности выборок и подавление статических эффектов. Оптимальными для анализа следует признать данные, обработанные по стандартному графу, на этапе второй - третьей итерации определения кинематических параметров.

Выводы

Данные трехмерных наблюдений сейсморазведки содержат важную информацию о

скоростях и анизотропии, не полностью используемую в стандартном графе обработки. Эта дополнительная информация позволяет определить различные азимутальные факторы, и использование ее представляется оправданным для повышения точности получаемых моделей.

Таким образом:

- Вид геометрии системы наблюдений оказывает существенное влияние на результаты скоростного анализа. Проектирование геометрии съемки 3D должно вестись с учетом возможности проведения обработки с привлечением истинно-трехмерных процедур

- Проведение азимутальных видов анализа позволяет уточнить значения параметров в точках анализа по выделенным направлениям.

- Индикатрисы эффективных скоростей (интервальных скоростей) дают представление о характере азимутальной анизотропии в среде.

По результатам расчета параметра обобщенного затухания ξ и его азимутальных зависимостей для данных 3D можно сделать следующие выводы:

- общий экспоненциальный затухающий характер кривых ξ хорошо согласуется с теоретическими предпосылками, лежащими в основе рассматриваемого метода;

- локальные отклонения значений ξ на определенных временах t_0 очевидно коррелируются с отражениями, выделяемыми на полевых сейсмограммах;

- общий характер кривых ξ , рассчитанных в соседних точках, сохраняется от точки к точке за исключением локальных отклонений, связанных с сейсмическими отражениями;

- азимутальные диаграммы ξ для различных времен t_0 имеют унаследованный характер;

- при совмещении азимутальных диаграмм обобщенного параметра затухания с соответствующими кинематическими диаграммами выявляется противоположная направленность их максимумов;

- исходя из предположения, что для данного разреза направление максимальной эффективной скорости возможно обусловлено направлением трещиноватости, а затухание амплитуд максимально в противоположном направлении, можно предположить, что подобное направление максимумов кинематических и азимутальных диаграмм вызвано наличием анизотропии.

Благодарности:

Авторы глубоко признательны Адаму Константиновичу Урупову, чьи идеи легли в основу данной методики.

Литература

1. Урупов А.К. Основы трехмерной сейсморазведки. - М.: Нефть и газ, 2004.
2. Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. - М.: Недра, 1985.
3. Урупов А.К., Кивокурцев В.И. Способ интерпретации наблюдений по методу отраженных волн с помощью параметрических диаграмм (способ параметрических диаграмм). Разведочная геофизика, вып. 1, Недра, М., 1964, с.27-31
4. Cordson A. et al. Planning Land Seismic Surveys in Two and Three Dimensions. - SEG, 1999.
5. Vermeer Gijls. O. 3D-seismic survey design. - SEG, 2002.



ТЕЛЕМЕТРИЯ СЕГОДНЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ