

ПРОГНОЗ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН НИЖЕ ЗАБОЯ СКВАЖИНЫ

Мирзоян Ю.Д. «Нефтегеофизприбор»,

vsp@ngfp.ru, г. Краснодар

Прогноз скоростей V_p и V_s ниже забоя скважины имеет важное практическое значение при поисковых сейморазведочных работах на нефть и газ.

Значение скоростей ниже забоя скважины позволяет с большей достоверностью и надежностью оценить глубины до исследуемых границ, проводить структурные построения и прогнозировать вещественный состав нескрытых отложений.

В работе рассматривается задача прогнозирования скоростей P и S волн ниже забоя скважины послойно сверху вниз. Предположим, что найдены скорости P и S в первых ($n-1$ -ом) слоях и требуется определить скорости V_n и U_n P и S волн в n -ом слое. Решение данной задачи осуществляется в два этапа. Сначала по годографу P волн вычисляются скорости V_{n_p} продольных волн, а затем по годографу PS волн находится скорость U_{n_s} поперечных волн.

Прежде всего найдем скорость V_{n_p} продольных волн и мощность h_n слоя по годографу P волн. Пусть ℓ - расстояние от источника до скважины, t_p - время прихода P волны, вышедшей из источника, отразившейся от n -ой границы и пришедшей в точку приемника, расположенного в n -ом слое. Тогда можно записать равенства:

$$t_p = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} + \sum_{i=m}^n \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}}$$

$$\ell = \lambda \sum_{i=1}^n \frac{h_i V_i}{\sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} + \lambda \sum_{i=m}^n \frac{h_i V_i}{\sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} \quad (1)$$

Здесь V_{pi} - скорость продольных волн в i -ом слое, $\lambda = \frac{\sin \alpha}{V_m}$ - лучевой параметр, α - угол, образованный лучом в приемнике с осью OZ , h_i - мощность i -го слоя.

Пусть V_* - кажущаяся скорость годографа $t(z)$, определяемая по наблюдениям. Тогда из закона Бендорфа можно найти $\lambda = \frac{\sqrt{V_*^2 - V_m^2}}{V_* V_m}$ (2) $V_* = \frac{V_m}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma}} = \frac{V_m}{\sqrt{1 - \sin^2 x}}$

Рассматривая равенства (1) как систему уравнений относительно V_n, h_n , можно найти:

$$V_n = \sqrt{\frac{b_{n-1}}{\lambda a_{n-1}}}, \quad h_n = \frac{1}{2} a_{n-1} V_n \sqrt{1 - \lambda^2 V_n^2} \quad (3)$$

где

$$a_{n-1} = t_p - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} + \sum_{i=m}^{n-1} \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} \quad \text{время}$$

(4)

$$b_{n-1} = \ell - \lambda \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i V_i}{\sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} + \lambda \sum_{i=m}^{n-1} \frac{h_i V_i}{\sqrt{1 - \lambda^2 V_i^2}} \quad \text{расстояние}$$

Так как по предположению параметры первых $n-1$ слоев известны, а λ , находится по формуле (2), то a_{n-1} , b_{n-1} также известны и формулы (3) дают значения скорости V_{pn} продольной волны и мощности h_n слоя.

На втором этапе по годографу PS волны, обменявшейся при отражении от n -ой границы, определяется скорость U_{sn} S волны в n -ом слое и его мощность h_n . Для годографа t_{ps} обменной волны справедливы равенства:

$$t_{ps} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - \mu^2 V_i^2}} + \sum_{i=m}^n \frac{h_i}{U_i \sqrt{1 - \mu^2 U_i^2}} \quad (5)$$

$$\ell = \mu \sum_{i=1}^n \frac{h_i U_i}{V_i \sqrt{1 - \mu^2 V_i^2}} + \sum_{i=m}^n \frac{h_i U_i}{U_i \sqrt{1 - \mu^2 U_i^2}}$$

Здесь t_{ps} - время пробега обменной $P-S$ волны, возбужденной в источнике на расстоянии ℓ от скважины и зарегистрированной в приемнике в m -ом слое, μ - лучевой параметр, связанный с кажущейся скоростью U^* формулой:

$$\mu = \frac{\sqrt{U_*^2 - U_m^2}}{U_* U_m} \quad (6)$$

Рассматривая (5) как систему уравнений относительно h_n , U_n , находим:

$$U_n = \sqrt{\frac{C_n}{\mu d_n}}; \quad h_n = C_n U_n \sqrt{1 - \mu^2 U_n^2} \quad (7)$$

где

$$C_n = t_{ps} - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i \sqrt{1 - \mu^2 V_i^2}} - \sum_{i=m}^{n-1} \frac{h_i}{U_i \sqrt{1 - \mu^2 U_i^2}} \quad (8)$$

$$d_n = \ell - \mu \sum_{i=1}^n \frac{h_i V_i}{\sqrt{1 - \mu^2 V_i^2}} - \sum_{i=m}^{n-1} \frac{h_i U_i}{\sqrt{1 - \mu^2 U_i^2}}$$

В правой части формул (8) стоят известные величины, поэтому формулы (7) дают значение скорости S волн и мощность n -го слоя. Отметим, что мощность h_n слоя находится по двум годографам - продольных и обменных волн, поэтому совпадение оценок мощности слоя служит признаком правильной привязки годографов.

Теперь дадим способ расчета параметров схемы наблюдений, при которых пластовые скорости P и S волн прогнозируются с заданной точностью. Пусть Z - глубина погружения приемника, ℓ - расстояние от источника до скважины, H - мощность известной части разреза -

глубина кровли оцениваемого слоя, $\eta = t_n / (t_n - t_{n-1})$ - отношение времени t продольной волны, отразившейся от подошвы n -го слоя, к разности времен P волн, отразившихся от подошвы и кровли слоя, δV_* - погрешность определения кажущейся скорости, вычисленной по годографу P -волн, отразившихся от подошвы n -го слоя.

Методами математической статистики можно получить формулу, связывающую погрешность δV_n определения скорости P -волн в n -ом слое через величины η , δV_* , получаемые из наблюдаемых данных, и параметры z , ℓ схемы наблюдений:

$$\delta V_n = \left(\frac{2H - Z}{\ell} \right)^2 \frac{\eta \cdot \delta V_*}{\sqrt{1 + \frac{\ell^2}{(2H - Z)^2}}}$$

Кроме того, используя полученные формулы можно графическим способом определить ℓ и Z схемы наблюдений, позволяющие прогнозировать скорости P -волн ниже забоя скважины.

Пусть известны погрешность δV_* в определении кажущейся скорости, параметр $\eta = \frac{t_n}{t_n - t_{n-1}}$,

получаемых из наблюдаемых годографов волн, отразившихся от подошвы и кровли оцениваемого слоя. Требуется найти соотношение между параметрами ℓ , Z схемы наблюдений и мощностью H известной части разреза.

На плоскости δV_* , δV_n (рис. 1) откладывается точка N с абсциссой, равной погрешности в вычислении кажущейся скорости V_* , по годографу P волн, и ординатой, равной погрешности, с которой задано определение скорости P волны в слое. Через точку M и начало координат проводится прямая до ее пересечения в точке N с вертикальной прямой, показанной пунктиром. Через точку N проводим горизонтальную прямую до пересечения ее с кривой для соответствующего значения параметра η в плоскости K_p , ξ . Пусть Q точка пересечения горизонтальной прямой с кривой. Тогда ее абсцисса ξ связывает параметры ℓ , Z расстановка и глубину H известной части разреза:

$$\xi_p = \frac{\ell}{2H - Z}$$

Условие на параметры ℓ , Z схемы наблюдений, при которых погрешность в прогнозировании скорости P волн в слое не превосходит заданной величины (ординаты точки M на плоскости δV , δV_*) и имеет вид:

$$\xi(2H - Z) \leq \ell \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим прогнозирование слоя мощностью 500м, расположенного на глубине 2000м. Пусть приемник расположен на глубине 2000м - на забое скважины, тогда $\eta \approx 5$. Предполагая, что кажущаяся скорость V_* , P -волн измерена с точностью 100м/с, требуется спрогнозировать скорость P -волн с точностью 150м/с. Откладывая точку

$M(0.1; 0.15)$ и получая точку $N(0.05; 0.075)$, проводится через нее горизонтальная прямая до пересечения с кривой, соответствующей $\eta=5$, получается абсцисса ξ , точки Q : $\xi=1.25$. Тогда из (9) получаем условие на удаление ℓ источника от скважины, гарантирующая заданную точность: $\ell \geq 1.25(4-2)=2.5$ км

Если же прогнозируется скорость в слое мощностью 1000м, то $\eta=3$ и $\xi=1$. Отсюда следует, что удаление ℓ источника должно быть не меньше 2км.

Аналогично можно предложить графический способ определения схемы наблюдений, дающий возможность прогнозировать скорость S волн с заданной точностью.

Пусть известна δU_* погрешность определения кажущейся скорости по годографу PS волн, параметр $\eta=t_n/(t_n-t_{n-1})$ и величина $\gamma=V_s/V_p$ - отношение скоростей S и P волн. Для нахождения условия на схему наблюдений, позволяющей спрогнозировать скорость S волн с нужной точностью, поступим следующим образом.

На плоскости δU_* , SU_n (рис. 2) откладываем точку M с абсциссой равной погрешности в определении кажущейся скорости по годографу PS волн, и ординатой, равной погрешности в определении скорости S волн в слое. Через точку M_{ps} и начало координат проводим прямую до ее пересечения в точке N_{ps} с вертикальной прямой, соответствующей заданному значению γ . Через точку N_{ps} проводим горизонтальную прямую до пересечения в точке Q_{ps} с кривой, соответствующей параметру η_{ps} , который находится по формуле:

$$\eta_{ps} = \frac{t_n}{t_n - t_{n-1}} + K_p$$

Здесь K_p - ордината точки Q , получаемой при определении погрешности в прогнозировании скорости P волн (рис. 1).

Абсцисса точки Q_{ps} дает величину ξ_{ps} , которая связана с глубиной Z приемника, выносом ℓ источника с глубиной H известной части разреза, определяется по формуле

$$\xi_{ps} = \frac{\ell}{H(1+\gamma) - Z},$$

тогда условие того, что погрешность в определении скорости S волн, прогнозируемой в слое, имеет вид:

$$\ell \geq \xi \cdot [H(1+\gamma) - Z] \quad (10)$$

Пусть, например, H и Z принимают те же значения, что ранее, то есть $P=2000$ м= Z ; $\gamma=0.5$; $\delta U_* = 0.1$ км/с; требуется найти условие на ℓ , при котором погрешность в определении скорости S волн в слое не превышает $\delta U = 0.075$ км/с. Тогда находим точку $N(0.2; 0.2)$, проводим прямую NP

$$\eta_{ps} = 6 + t_n / (t_n - t_{n-1}).$$

Если мощность прогнозируемого слоя составляет 500м, то $\eta_{ps} \approx 7$ и $\xi_{ps} = 1.50$, тогда

условие (10) принимает вид:

$$\ell \geq 1.50(3-2) = 1.5 \text{ км}$$

Если же мощность оцениваемого слоя составляет 1000м, то $t_n/(t_n - t_{n-1}) = 3$, $\eta_{ps} \approx 5$ и $\xi_{ps} = 1.25$, тогда для прогнозирования скорости S волн с погрешностью 75м/с достаточно удаления источника в 1250м от скважины.

Кроме этого, на основе аналитических зависимостей созданы алгоритмы и программы обработки наблюдений ПМ ВСП для изучения скоростей продольных и поперечных волн ниже забоя скважины.

Можно отметить, что, прежде всего, проводится прогноз P -волны ниже забоя скважины, причём в несколько этапов, включающих:

- 1) Разделение падающих и отражённых волн на участке волнового поля вблизи забоя скважины;
- 2) Применение оптимальной деконволюции поля отражённых PP -волн, причём форма сигнала рассчитывается по полю падающих волн;
- 3) Очистка трасс от случайного шума путем синфазного суммирования однотипных волн на выбранной базе;
- 4) Коррекция записи за геометрическое расхождение и поглощение восходящих волн. Результирующая трасса подвергается динамической инверсии для получения прогнозных зависимостей акустических импедансов и коэффициентов отражения;
- 5) Интерактивная интерпретация результатов динамической инверсии – разбивка по пластам, подбор пластовых скоростей и плотностей, переход из функции времени в функцию глубины.

Для выполнения прогноза скоростного разреза выбирается интервал с перекрытием вскрытой части разреза. Это позволяет сравнить и оценить достоверность прогноза скоростей P -волны. Весь этот процесс выполняется посредством сопоставления прогнозных кривых вертикального годографа и скоростей во вскрытой части разреза с графиками, построенными по наблюдаемым данным АК и ВСП. (сводная кривая скоростей V_p составлена по результатам обработки записей в интервале 4370-5450м)

Прогнозная кривая скоростей V_p во вскрытой части разреза согласуется с вертикальным годографом $t_p(H)$, построенным по первым вступлениям P -волны. По результатам прогноза можно отметить, что уровень значений скоростей является сравнительно высоким – V_p в интервале 4870-5100м достигает значений 5000м/с. Вертикальный годограф P -волны $t_p(H)$ был продлён до глубины 5450м с интервальной скоростью 3860м/с.

Прогноз скоростей S -волны осуществляется при использовании полученных данных о скоростях P -волны путём решения прямой задачи для волнового поля отражённых PS -волн.

Процесс прогноза схематично можно представить следующим образом:

- проводится корреляция осей синфазности целевых горизонтов по сейсмограмме ВСП и создаётся геометрическая модель с заданными границами;

- определяются скорости V_p и мощности пластов по выбранным границам и формируется предварительная пластовая скоростная модель до забоя скважины;

- используя способ итерации формируется скоростная модель для пласта ниже забоя скважины таким образом, чтобы оси синфазности, выделенные на сейсмограмме ВСП и определённые с помощью прогнозной модели, максимально совпадали (рис. 3). Процесс уточнения скоростной модели выполняется в интерактивном режиме.

Полученные прогнозные годографы P - и S -волн позволяют определить упругие параметры ниже забоя скважины. Ниже забоя скважины выделяется область повышенных значений скоростей V_p и V_s в интервале глубин 4800-5120м (рис. 1), на прогнозных кривых коэффициентов гамма γ и коэффициентов Пуассона σ , соответствующих этому интервалу глубин, отмечаются повышенные значения γ (0,64) и пониженные значения σ (0,16) (рис. 3).

Эти данные представляют практический интерес, так как обеспечивают построение глубинных разрезов и позволяют ориентировочно оценить литолого-стратиграфическую характеристику глубоких отложений.

В заключение выражаю благодарность Э. Блясу за выполненное им математическое решение задачи, рассмотренной в данной работе.