Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXIX, вып. 2, 1961 г.

О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ИСТОЛКОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ВОСТОКЕ РУССКОЙ ПЛАТФОРМЫ

С. В. Крылов

На востоке Русской платформы сейсмический метод отраженных волн является основным методом поисков погребенных нефтеносных структур. Из-за сложных сейсмогеологических условий этого региона геологическая эффективность сейсморазведки по поискам локальных пологих понятий в отложениях карбона и девона остается в ряде районов низкой. Имеются значительные трудности как при проведении полевых наблюдений, так и при геологическом истолковании полученных материалов [2, 3].

Построение отражающих горизонтов, приуроченных к отложениям карбона и девона, основывается на следующем допущении: комплекс карбонатных отложений нижней перми, карбона и девона мощностью более километра объединяется в один пласт, причем скорость распространения упругих волн в нем принимается постоянной в пределах каждой отдельной разведочной площади.

Б. А. Андреев указал на существование *послойной зональности* физических свойств осадочных пород [1]. Это явление состоит в том, что физические свойства одноименных литолого-стратиграфических комплексов пород под влиянием различных структурных и фациальных факторов изменяются по напластованию. Указанное изменение находится в определенной связи с характером залегания слоев горных пород. В условиях Волго-Уральской нефтеносной области основным геологическим фактором, обусловливающим послойное изменение физических свойств горных пород на локальных структурах, является изменение интенсивности проявления тектонической трещиноватости карбонатных пород перми, карбона и девона [1].

Таким образом, принимаемое в практике сейсмических работ на платформе допущение о постоянстве скорости упругих волн в карбонатном комплексе осадков является малосостоятельным. Оценим величину возможных ошибок в положении отражающего горизонта вследствие отличия реальных условий от этого допущения. Все рассуждения будем вести для сейсмического луча, падающего по нормали к отражающей границе, залегающей в точке падения луча горизонтально. Такое упрощение для условий пологих структур не приведет к существенным ошибкам; аналогичные допущения обычно делаются и при построении отражающих границ.

Введем обозначения:

v — постоянное значение скорости упругих волн в карбонатной толще, принятое при построении отражающего горизонта;

H — расстояние по вертикали от кровли карбонатного комплекса до этого отражающего горизонта, построенного с постоянной скоростью;

Δv — величина отклонения скорости упругих волн от принятого значения v;

ΔH — ошибка в глубине до отражающего горизонта, получающаяся вследствие неучета изменения скорости Δv;

t_0 — время под пунктом взрыва, приведенное к кровле карбонатного комплекса.

Эти величины связаны между собой двумя очевидными уравнениями:

$$H = \frac{vt_0}{2};$$

$$H + \Delta H = \frac{t_0}{2}(v + \Delta v).$$

Исключив из них величину t_0, получим

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta v}{v}. \qquad (1)$$

Положим $H = 1500$ *м*, $\frac{\Delta v}{v} = 2\%$. Подставив эти величины в формулу (1), получим $\Delta H = 30$ *м*, что сравнимо по величине с амплитудой пологих платформенных поднятий, являющихся объектом поисков. Приведенные расчеты ясно показывают, что неучет даже незначительных по величине (порядка первых процентов) изменений скорости упругих волн в комплексе карбонатных отложений приводит к значительным ошибкам на сейсмических разрезах и картах. Когда область наиболее интенсивного проявления тектонической трещиноватости, а следовательно, и связанного с ней уменьшения скорости упругих волн, приурочена к своду поднятия, возможен пропуск этого поднятия.

Для изучения послойной зональности скорости упругих волн в комплексе карбонатных отложений совместно рассматривались результаты сейсмических работ и глубокого бурения на площадях, достаточно полно изученных как бурением, так и сейсморазведкой. Для ряда точек, расположенных на сейсмических профилях, определялась величина H. Для тех же точек определялась величина ΔH как разность абсолютных отметок отражающего горизонта, построенного с постоянной скоростью v, и той стратиграфической поверхности, с которой отождествляется данный сейсмический горизонт. По формуле (1) рассчитывались значения $\frac{\Delta v}{v}$. Результаты этих расчетов представлялись в виде карт и графиков «относительных аномалий скорости» $\frac{\Delta v}{v}$. Данные расчеты производились для горизонтов, приуроченных к отложениям нижнекаменноугольного и девонского возрастов.

Такие построения были проделаны на семи разведочных площадях, расположенных на территории Западной Башкирии, Восточной Татарии, Оренбургской и Куйбышевской областей.

Очевидно, величины H и ΔH могут содержать погрешности, вызванные недостаточно точным учетом влияния среды, покрывающей карбо-

натную толщу, ошибками при корреляции волн и пр. Чтобы свести до минимума влияние этих погрешностей на величину $\frac{\Delta v}{v}$, рассматривались разведочные площади, на которых получены первичные материалы хорошего качества и проведен наиболее полно учет влияния верхней неоднородной части разреза. Поэтому можно считать, что полученные карты и графики относительных аномалий скорости дают приближенную, но достаточно объективную характеристику изменений по площади средней скорости упругих волн в интервалах между кровлей карбонатного комплекса и отражающими горизонтами в карбоне и девоне.

На картах и графиках относительных аномалий скорости выделяются зоны повышенных («положительные аномалии») и пониженных («отрицательные аномалии») значений скорости упругих волн. Полная амплитуда относительных изменений скорости в пределах отдельных площадей различна. Для Султангуловской, Покровской и Серафимовской площадей, характеризующихся резкими структурными формами, относительные изменения скорости достигают 4—5%. На более пологих структурах (Арлан, Азнакаево и др.) эти изменения лежат в пределах 2—3%.

На Султангуловской и Серафимовской площадях были рассчитаны аномалии скорости для двух интервалов: от кровли карбонатного комплекса (кунгурский ярус нижней перми) до кровли терригенных отложений нижнего карбона и от кровли карбонатного комплекса до кровли пашийских слоев верхнего девона. Сопоставление аномалий скорости для этих двух интервалов показывает, что в общих чертах они совпадают друг с другом, различия отмечаются только в деталях.

Сопоставление относительных аномалий скорости со структурными планами различных стратиграфических границ в карбонатном комплексе показало, что расположение этих аномалий в плане, их интенсивность и знак тесно связаны с формой залегания слоев горных пород. Наиболее четко проявляется связь изменений скорости упругих волн с формой структурного рельефа слоев горных пород, залегающих вблизи кровли карбонатного комплекса. Эта зависимость становится еще более очевидной, если от рассмотрения структурных карт перейти к рассмотрению карт *кривизны* стратиграфических поверхностей.

Карты кривизны дают количественную характеристику изгиба слоев горных пород. Участкам изгиба слоев с выпуклостью, обращенной в сторону земной поверхности, соответствуют отрицательные кривизны; вогнутые участки характеризуются положительной кривизной. Местам наиболее интенсивного изгиба слоев горных пород соответствуют максимальные абсолютные значения кривизны. Были построены карты кривизны стратиграфических поверхностей, залегающих вблизи кровли комплекса карбонатных отложений. В качестве таких поверхностей были взяты: для площадей, расположенных на территории Западной Башкирии, поверхность артинского яруса нижней перми; для Покровской площади — кровля швагеринового горизонта сакмарского яруса нижней перми; для Султангуловской площади — кровля калиновской свиты казанского яруса верхней перми. На методике построения таких карт мы остановимся ниже.

Совместное рассмотрение карт относительных аномалий скорости и карт кривизны поверхностей, залегающих вблизи кровли карбонатного комплекса, выявляет следующие закономерности. Зоны аномальных значений скорости упругих волн приурочены к участкам наибольших кривизн, т. е. к местам максимального изгиба слоев горных пород. Причем к участкам с большей кривизной приурочены более интенсивные аномалии скорости. Отрицательные аномалии скорости располагаются на

участках отрицательных кривизн, положительные аномалии совпадают с участками положительных кривизн. Такая закономерность устанавливается достаточно четко: она имеет место на шести из семи рассмотрен-

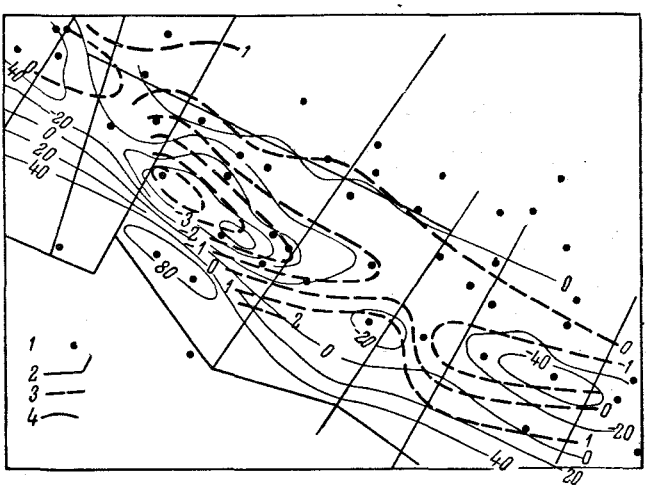


Рис. 1. Аномалии скорости $\frac{\Delta v}{v}$ и схема кривизн K поверхности карбонатного комплекса. Султангуловская площадь: *1* — буровые скважины; *2* — сейсмические профили; *3* — изолинии $\frac{\Delta v}{v}$, %; *4* — изолинии K, $10-6$ $м^{-1}$

ных площадей. Только на Шкаповской площади аномалии скорости расположены без видимой связи с кривизной поверхности артинских отложений. В качестве примера приводим сопоставление кривизн стратигра-

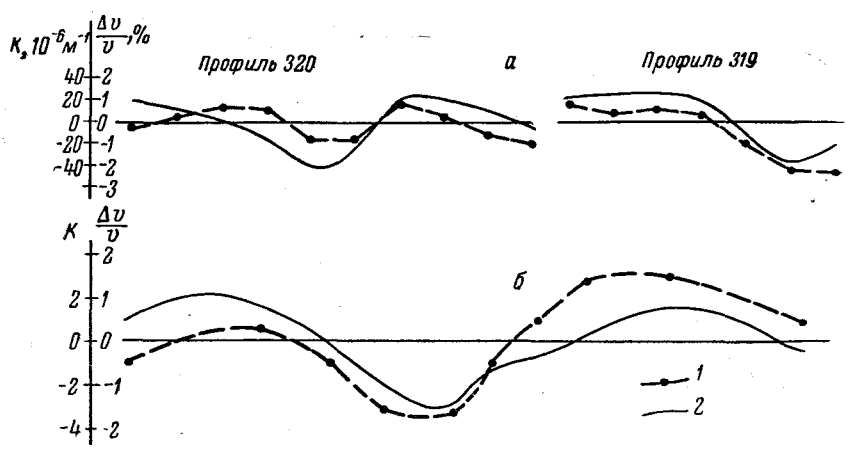


Рис. 2. Графики аномалий скорости и кривизн поверхности карбонатного комплекса:

а — Серафимовская площадь; *б* — Арланская площадь: *1* — кривая $\frac{\Delta v}{v}$; *2* — кривая K

фических границ, залегающих вблизи кровли карбонатного комплекса, и аномалий скорости по Султангуловской (рис. 1), Серафимовской и Арланской площадям (рис. 2).

Частным случаем этой закономерности является уменьшение скорости упругих волн над сводами поднятий и повышение на участках от-

рицательных структурных форм слоев горных пород, залегающих вблизи кровли карбонатной толщи. Такой случай имеет место для симметричных структур (Азнакаево). На структурах с ясно выраженной асимметрией (Султангулово, Покровка) области отрицательных кривизн и отрицательных аномалий скорости смещаются в сторону крутого крыла.

Закономерная связь изменений скорости упругих волн с кривизной слоев в верхней части карбонатного комплекса сохраняется и в том случае, когда имеется резкое несоответствие структурных планов внутри этого комплекса. Примером, подтверждающим это положение, может служить Азнакаевская площадь, где по верхнедевонским отложениям устанавливается ясно выраженное поднятие, а каменноугольные слои залегают моноклинально. Над сводом девонского поднятия расположена область повышенных значений скорости упругих волн в интервале, соответствующем полной мощности карбонатной толщи (положительная аномалия скорости интенсивностью до 2%). Эта положительная аномалия скорости совпадает с областью положительных кривизн слоев нижнепермского возраста.

Тесная связь изменений средней скорости упругих волн в комплексе карбонатных отложений со структурным рельефом слоев, залегающих вблизи кровли этого комплекса, может быть объяснена тем, что наиболее интенсивные изменения упругих свойств имеют место в верхней части карбонатной толщи. С этой точки зрения может быть объяснено и описанное выше приближенное совпадение аномалий скорости для различных интервалов карбонатной толщи, поскольку верхняя часть толщи целиком входит в каждый из этих интервалов и оказывает свое влияние на их суммарную скоростную характеристику. По-видимому, тектоническая трещиноватость карбонатных пород более интенсивно проявляется в верхних горизонтах, подвергающихся наибольшему растяжению при изгибе. В более глубоко залегающих отложениях, испытывающих бо́льшую статическую нагрузку, деформации по своему характеру могут быть близки к пластическим и вследствие этого процессы образования тектонических трещин здесь будут развиты меньше. Кроме того, в глубоких горизонтах условия для закрытия («залечивания») образовавшихся трещин более благоприятны.

Наличие аномалий скорости положительного знака на участках с положительной кривизной может быть объяснено сжатием слоев горных пород, ведущим к закрытию ранее имевшихся пор и трещин, а также, возможно, и напряженно-деформированным состоянием вещества этих пород [4].

Полученную зависимость изменений средней скорости упругих волн в комплексе карбонатных отложений от кривизны поверхности, характеризующей структуру верхних горизонтов этого комплекса, можно использовать для решения обратной задачи: зная форму этой поверхности, уточнить скоростную характеристику карбонатной толщи. Решение такой задачи имеет большое практическое значение, так как позволит приближенно учесть изменение упругих свойств карбонатной толщи по площади работ и тем самым повысить эффективность применения сейсмических методов при поисках и разведке пологих платформенных структур в глубоких горизонтах палеозоя.

Для перехода от значений кривизн K к относительным изменениям скорости упругих волн $\frac{\Delta v}{v}$ необходимо установить количественную

связь между этими величинами. Приближенно можно считать, что между $\frac{\Delta v}{v}$ и K имеет место линейная связь вида

$$\frac{\Delta v}{v} = qK,$$

где q — коэффициент пропорциональности, подлежащий определению.

Для площадей, достаточно полно исследованных сейсморазведкой и глубоким бурением по одноименным горизонтам, коэффициент q может быть получен как частное от деления величины $\frac{\Delta v}{v}$, или равной ей величины $\frac{\Delta H}{H}$, на значения K в ряде точек с последующим осреднением полученных результатов. Значение q может быть получено с использованием известных методов математической статистики [5].

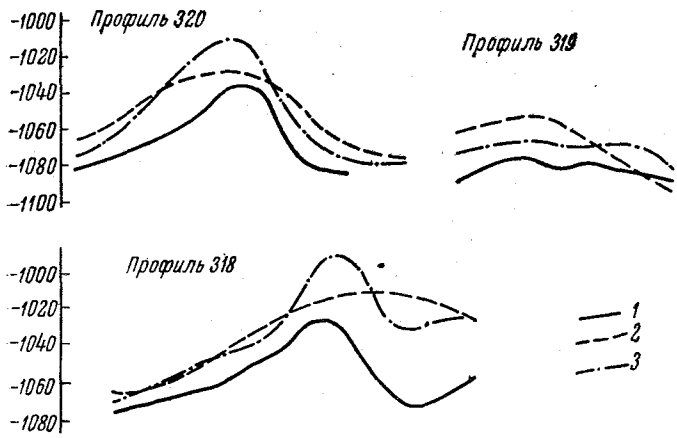


Рис. 3. Сейсмические разрезы. Серафимовская площадь:

1 — кровля C_1^{2h} по данным бурения; *2* — отражающий горизонт, построенный с постоянной скоростью упругих волн в карбонатной толще; *3* — то же, с учетом изменений скорости

Рассмотрим в качестве примера Серафимовскую площадь. Здесь описанным выше способом была получена количественная зависимость между $\frac{\Delta v}{v}$ и K, на основании которой рассчитаны значения $\frac{\Delta v}{v}$ и внесены соответствующие поправки в сейсмические разрезы, построенные ранее при постоянном значении скорости упругих волн в карбонатном комплексе. Исправленные сейсмические разрезы (рис. 3) находятся в большем соответствии с данными бурения, чем те же разрезы до введения поправок. Расположение сейсмического горизонта на всех профилях выше поверхности кровли C_1^{2h}, с которой он отождествляется, может быть объяснено несколько заниженным значением скорости v, принятым при построениях.

Рассмотренный пример показывает, что такой учет изменений скорости упругих волн в карбонатном комплексе может дать существенное уточнение результатов сейсморазведки. Установив количественную связь между изменениями скорости и кривизной верхних слоев карбонатного комплекса для уже разбуренных сейсмических структур, можно экстраполировать эту связь на близлежащие участки, находящиеся в аналогичных сейсмогеологических условиях. Сведения о поверхности карбо-

натного комплекса могут быть получены из данных структурного бурения на нижнепермские отложения, а при благоприятных сейсмогеологических условиях и в результате проведения сейсмических работ. В том и другом случае не потребуется дополнительных полевых исследований, так как поверхность карбонатного комплекса изучается с целью учета влияния верхнего терригенного комплекса осадков на время пробега упругих волн, соответствующих глубоким отражающим горизонтам.

В заключение остановимся на методике вычисления кривизн. Рассмотрим среднюю кривизну K поверхности, заданной структурной картой. Как известно [6], величина K в данной точке определяется следующим образом:

$$K = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \qquad (2)$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны в плоскостях главных нормальных сечений данной поверхности.

Таким образом, определение величины K сводится к определению радиусов кривизны этих двух сечений. Рассмотрим одно из главных нормальных сечений. Пусть A, O и B — точки рассматриваемой границы, расстояние между ними по оси x равно x_0 (рис. 4). Начало координат поместим в точку O. Определим радиус R окружности, проходящей через эти три точки. Если расстояние x_0 между этими точками выбрано надлежащим образом, то величину R можно рассматривать как радиус кривизны данного сечения. Обозначим через a и b координаты центра окружности. Из чертежа следует

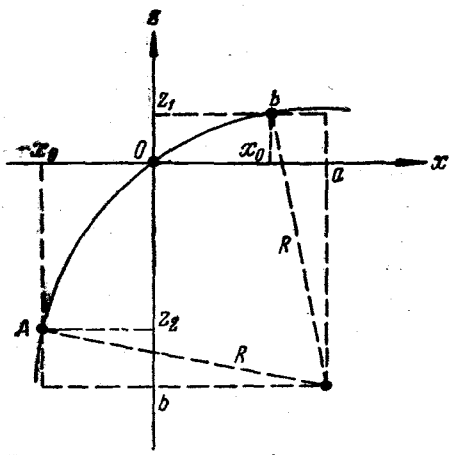


Рис. 4. К выводу формулы для вычисления кривизны

$$a^2 + b^2 = (a - x_0)^2 + (b - z_1)^2;$$

$$a^2 + b^2 = (a + x_0)^2 + (b - z_2)^2.$$

Решая систему этих двух уравнений, получаем выражения для координат центра окружности:

$$a = \frac{(z_2 - z_1)(x_0^2 - z_1 z_2)}{2x_0(z_1 + z_2)};$$

$$b = \frac{2x_0^2 + z_1^2 + z_2^2}{2(z_1 + z_2)}.$$

Найдем выражение для величины

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} =$$

$$= \frac{2(z_1 + z_2)}{\sqrt{\frac{(z_2 - z_1)^2 (x_0^2 - z_1 z_2)^2}{x_0^2} + (2x_0^2 + z_1^2 + z_2^2)^2}}.$$

Поделив числитель и знаменатель полученного выражения на x_0^2 и сделав простые преобразования в подкоренном выражении, получим

$$\frac{1}{R}=\frac{2(z_1+z_2)}{x_0^2\sqrt{\left(\frac{z_2}{x_0}-\frac{z_1}{x_0}\right)^2\left(1-\frac{z_1}{x_0}\frac{z_2}{x_0}\right)^2+\left(2+\frac{z_1^2}{x_0^2}+\frac{z_2^2}{x_0^2}\right)^2}}.$$

Частные $\frac{z_1}{x_0}$ и $\frac{z_2}{x_0}$, входящие в подкоренное выражение, по абсолютной величине не превосходят единицы, а для пологих поверхностей их величина значительно меньше единицы. Раскрыв скобки в подкоренном выражении и отбросив, ввиду их малости, члены, содержащие $\frac{z}{x_0}$ в степени выше первой, получим

$$\frac{1}{R}=\frac{z_1+z_2}{x_0^2}. \qquad (3)$$

Для пологих поверхностей (с углами наклона, изменяющимися в пределах не более 10°) формула (3) дает погрешность, не превышающую 5%, что вполне приемлемо для данных целей.

В качестве плоскостей главных нормальных сечений возьмем вертикальные плоскости, секущие рассматриваемую границу соответственно вкрест и по простиранию.

Определение кривизны K по структурной карте сводится к следующим операциям. Выбирается величина x_0; она должна быть такой, чтобы на интервале $2x_0$ кривизна поверхности менялась незначительно. Ориентировочно можно принять x_0 в 3—5 раз меньше поперечных размеров структур. Со структурной карты снимаются абсолютные отметки рассматриваемой поверхности в трех точках: в точке, для которой определяется кривизна, и в двух точках, расположенных по обе стороны от первой на расстоянии x_0. Все эти точки должны лежать на одной прямой, перпендикулярной ближайшей изогипсе. Вычисляются величины z_1 и z_2 как разности между абсолютными отметками каждой из крайних точек и отметкой центральной точки. По формуле (3) определяется величина $\frac{1}{R_1}$. Проделав аналогичные действия в направлении, параллельном ближайшей изогипсе, получим величину $\frac{1}{R_2}$. Подставив эти величины в формулу (2), получим искомую величину средней кривизны поверхности в данной точке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б. А. Послойная зональность физических свойств осадочных пород и ее связь со структурами платформенных областей. «Советская геология», 1957, № 61.
2. Богданов А. И. Усовершенствование методики поисков пологих структур методами сейсморазведки. «Геология нефти», 1959, № 4.
3. Клубов В. А. Эффективность сейсморазведки в Западной Башкирии и Восточной Татарии. «Геология нефти», 1957, № 1.
4. Ризниченко Ю. В., Силаева О. И. Определение зависимости скоростей распространения упругих волн в образцах горных пород от одностороннего давления. Изв. АН СССР, серия геофизич., 1955, № 3.
5. Романовский В. И. Применение математической статистики в опытном деле. Гостехиздат, 1947.
6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. Гостехиздат, 1957.