

УДК 54.027:546.22:549.76:551.44

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.90.06>

Т. Ахмедов, д-р геол.-минералог. наук, проф.,

E-mail: akhmedov.tofik@bk.ru,

Государственный университет нефти и промышленности,

г. Баку, Азербайджан

ФОРМА СЕЙСМИЧЕСКОГО ГОРИЗОНТА НА ВРЕМЕННОМ РАЗРЕЗЕ И ГОДОГРАФА ОБЩЕЙ ТОЧКИ ВЗРЫВА ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ В ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЕ ДЛЯ СЛУЧАЯ, КОГДА ПОКРЫВАЮЩАЯ ЦЕЛЕВОЙ ГОРИЗОНТ СРЕДА ОСЛОЖНЕНА НАРУШЕНИЕМ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук О.І. Меньшовим)

Посвящено изучению форм оси синфазности (сейсмического горизонта) и годографа общей точки взрыва (ОТВ) отраженной волны, когда база приема сейсмических колебаний находится в переходной зоне, т.е. часть базы находится все еще в одном крыле, а другая часть переходит в следующее крыло. Выведено уравнение годографа способа центральных лучей (СЦЛ), т.е. осей синфазности отражений, для случая, когда покрывающая целевой горизонт среда осложнена нарушением. Затем выведено уравнения годографов ОТВ отраженной волны, восходящие лучи которой преломляются на линии нарушения. Для этого было использовано уравнение годографа нормальных отражений, преломленных на линии нарушения.

Используя выведенные формулы, были рассчитаны годографы ОТВ для различных моделей среды, анализ которых показал, что при прохождении базы приема сейсмических волн над нарушенной зоной годограф отраженной волны делится на два отрезка, имеющих разные кривизны и разные сдвиги во времени относительно друг друга в зависимости от различия скоростных разрезов в ту или иную сторону от линии нарушения, и все это создает впечатление, что эти отрезки не относятся к одному и тому же годографу.

Ключевые слова: сейсмическая разведка, дизъюнктивные дислокации, годограф СЦЛ, годограф ОТВ, переходная зона.

Введение. Дизъюнктивные дислокации (ДД) являются важнейшими тектоническими элементами геологического разреза (Ахмедов, Багиров, 2010). Они играют большую роль в формировании и разрушении ловушек углеводородов, но специальные геолого-геофизические исследования по изучению тектонических нарушений не проводятся (Кушнарев, 1977). Можно сказать, что единственным способом изучения ДД остается сейсморазведка, которая дает достаточно полную информацию о них. Основным объемом сейсмических исследований нарушений посвящен выделению, прослеживанию и систематизации кинематических и динамических признаков ДД на сейсмических временных разрезах 2D, 3D и в горизонтальных срезах кубов. Эти исследования обобщены в монографии Ю.С. Королькова и др. (Корольков и др., 2001).

Постановка проблемы. В нарушенных зонах часто наблюдаются зоны сложной сейсмической информации, размеры которых достаточно большие. На наш взгляд, в формировании этих зон особую роль играют волны, отраженные от границ, находящихся ниже нарушенной зоны, восходящие (отраженные) лучи которых преломляются на плоскости сбрасывателя при возвращении на поверхность земли. Эта проблема стоит особо остро при применяемых в сейсморазведке 3D базах наблюдений: при прохождении через нарушенную зону часть базы приема остается в одном крыле, а другая часть переходит в следующее крыло ДД (Ахмедов, Багиров, 2010).

Исследовательские вопросы. В цифровой обработке данных сейсморазведки одной из основных процедур обработки является ввод кинематических поправок с целью спрямления гиперболических годографов многократных перекрытий с последующим синфазным суммированием полезных волн для улучшения отношения сигнал/помеха и получения временных разрезов – куб сейсморазведки 3D. Реальная среда далека от той простой модели, которая применяется при вводе кинематических поправок (Личагина и др., 2009; Лавров и др., 2017).

Целью исследования является изучение формы годографа в случае осложнения покрывающей целевой границы среды нарушением.

Методология. Сначала выведем уравнение годографа способа центральных лучей (СЦЛ) отраженной волны, преломляющейся на плоскости сбрасывателя нарушения, а затем перейдем к выводу уравнения годографа общей точки взрыва (ОТВ) для того же случая (Marloes and Bastiaan, 2018; Hale, 2013; Luo and Hale, 2013).

Естественно, что годограф СЦЛ представляет собой ось синфазности нормальных отражений, т.е. это сейсмический горизонт на временном разрезе. Рассмотрим простейшую модель среды (рис. 1): двухслойная среда, разделенная одной отражающей границей произвольной формы (2 – 2), над которой расположена плоскость сбрасывателя (или линия нарушения) тоже произвольной формы (1 – 1). Касательные к этим линиям произвольной формы на рис. 1 обозначены через $1^1 - 1^1$ и $2^1 - 2^1$ соответственно. Среда, покрывающая отражающую границу $2^1 - 2^1$ разделена на две части скоростями v_1 и v_2 касательной к плоскости сбрасывателя $1^1 - 1^1$; здесь α и φ углы наклона касательных к выше названным линиям в точках преломления и отражения соответственно. Начало координат поместим вблизи нарушенной зоны в произвольной точке О и определим время вдоль нормального луча, перпендикулярного в точке R к отражающей границе глубиной $Z_R = Z_{R1} + Z_{R2} = Z_1 + Z_2$. Здесь Z_{R1} – глубина залегания по вертикали касательной к преломляющей границе (т.е. линии нарушения) непосредственно над точкой отражения R; Z_{R2} – расстояние по вертикали от точки отражения до касательной к промежуточной (преломляющей) границе; Z_1 – глубина по вертикали касательной к промежуточной (преломляющей) границе под началом координат; Z_2 – вертикальное расстояние между точкой отражения R и промежуточной (преломляющей) границей (рис. 1). Существует следующие связи между этими глубинами (расстояниями):

$$Z_{R1} = Z_1 + l_R \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

$$Z_{R2} = Z_2 + l_R \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

здесь l_R – абсцисса точки отражения.

Найдем горизонтальное расстояние δx между точкой преломления нормального луча на плоскости сбрасывателя нарушения Р и точки его отражения R на отражающей границе (рис. 1):

$$\delta x = \delta z \operatorname{ctg} \alpha,$$

с другой стороны, как видно из рис. 1, следующее выражение тоже верно для δx

$$\delta x = (Z_{R2} - \delta z) \operatorname{tg} \varphi,$$

после нескольких преобразований получим

$$\delta x = \frac{Z_{R2} \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

Теперь выведем уравнения годографов общей точки взрыва (ОТВ) отраженной волны, восходящие лучи которой преломляются на линии нарушения. Воспользуемся уравнением годографа нормальных изображений, преломленных на линии нарушения. Луч волны, отразившейся на точке Р, примем как луч нормального отражения от фиктивной границы (3 – 3) с углом наклона λ и проходящего через точку Р. Из рис. 2 видно, что

$$\lambda = 90^\circ - \beta; \beta = 90^\circ - (e + 2\varphi); \lambda = e + 2\varphi, \quad (18)$$

здесь угол e определяется координатами l_R и Z_R точки Р: $e = \arctg \frac{l_R}{Z_R}$; угол φ является углом наклона касательной к отражающей границе в точке Р.

Естественно, что время вдоль луча, исходящего из источника (т.е. начала координат) и отразившегося на точке Р, приходящего в пункт приема С, преломляясь в промежуточной границе, равняется

$$t = t_D + t_R, \quad (19)$$

здесь t_D – время пробега падающей волны вдоль луча ОР

$$t_D = \frac{OR}{v_2} = \frac{1}{v_2} \sqrt{l_R^2 + Z_R^2},$$

t_R – время пробега преломленной на промежуточной границе волны вдоль луча

$$t_R = \frac{Z_R - Z_P}{v \cos \lambda} + \frac{Z_P}{v_1 \cos (\alpha - i)}, \quad (20)$$

подставив выражения для Z_P и $Z_R - Z_P$, т.е. (14) и (15) в (20) и заменив угол наклона φ фиктивным углом λ , получим

$$t_R = \frac{Z_R - Z_1 - l_R \tg \alpha}{v_2 (1 + \tg \alpha \tg \lambda) \cos \lambda} + \frac{Z_1 + l_R \tg \alpha + Z_R \tg \alpha \tg \lambda}{v_1 (1 + \tg \alpha \tg \lambda) \cos (\alpha - i_1)}. \quad (21)$$

И наконец, объединяя выражения t_D и t_R , находим время

$$t = \frac{1}{v_2} \sqrt{l_R^2 + Z_R^2} + \frac{1}{v_1} \frac{Z_1 + l_R \tg \alpha + Z_R \tg \alpha \tg \lambda}{(1 + \tg \alpha \tg \lambda) \cos (\alpha - i_1)} + \frac{1}{v_2} \frac{Z_R - Z_1 - l_R \tg \alpha}{(1 + \tg \alpha \tg \lambda) \cos \lambda}. \quad (22)$$

Учитывая вышеприведенные обозначения и используя выражение (12), для абсциссы пункта приема С, т.е. для l , получим следующее выражение:

$$l = l_R + \frac{(Z_1 + l_R \tg \alpha) [\tg (\alpha - i_1) - \tg \lambda] + Z_R \tg \alpha [\tg \alpha \tg (\alpha - i_1) + 1]}{1 + \tg \alpha \tg \lambda}. \quad (23)$$

Результаты исследований. Выражения (22) и (23) являются уравнениями в параметрическом виде годографа ОТВ отраженной в целевом горизонте волны, восходящий луч которой преломляется на плоскости сбрасывателя нарушения при возвращении на поверхность земли. Очевидно, что можно легко решить прямую задачу, т.е. рассчитать годографы $t = f(\lambda)$, задав положения отражающей и преломляющей промежуточной границ. Эти выражения не могут быть использованы для годографов ОГТ, т.к. для данного случая невозможно составить единое уравнение, но можно сказать, что и годографы ОГТ тоже имеют два отрезка разной кривизны в разных сторонах от линии нарушения (*Недосекин и др., 2018; Charlotte et al., 2018*).

На рис. 3 приводятся отрезки годографов отраженной волны, восходящий луч которой преломляется на промежуточной границе (т.е. на линии нарушения), рассчитанных для простых моделей среды.

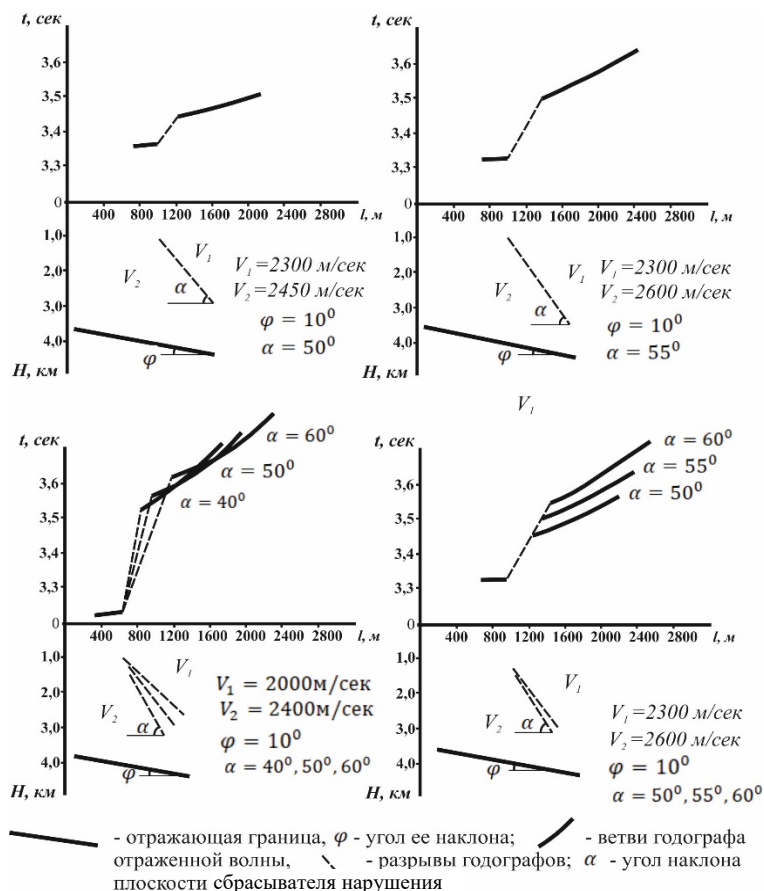


Рис. 3. Годографы ОТВ для различных моделей среды

Методика улучшения прослеживания сейсмических горизонтов в нарушенных зонах была применена на данных сейсморазведки 3D на одной из площадей Апшеронского полуострова, старейшего нефтегазоносного

региона Азербайджана, названного нами условно Хасилат. Эта площадь изучалась неоднократно сейсморазведкой, но детальное строение ее, особенно по глубоко залегающим отложениям нижнего плицена, миоцена и верхнего мела, оставалось недостаточно изученным.

На сейсмическом временном разрезе Inline 464 (рис. 5) выделен перспективный интервал в нижней части разреза, который осложнен нарушением с плоскостью сбрасывателя с большим наклоном к горизонту. Качество сейсмического материала и характер волнового поля хорошо иллюстрирует фрагмент временного разреза по этому профилю, отстрелянному на площади Хасилат (рис. 5, а), где выделяется зона сложной сейсмической информации около нарушения. После того как

выборка трасс в переходной зоне производилась с учетом преломления восходящего сейсмического луча по принципу ОСТ, были получены хорошие результаты (рис. 5, б). Как видно из рис. 5, б, зона сложной сейсмической информации почти исчезла и прослеживание горизонтов около нарушения существенно улучшилось, что позволило провести уверенную корреляцию целевых горизонтов. Это хорошо видно на фрагменте временного слайса (или разреза) вдоль линии Inline 464.

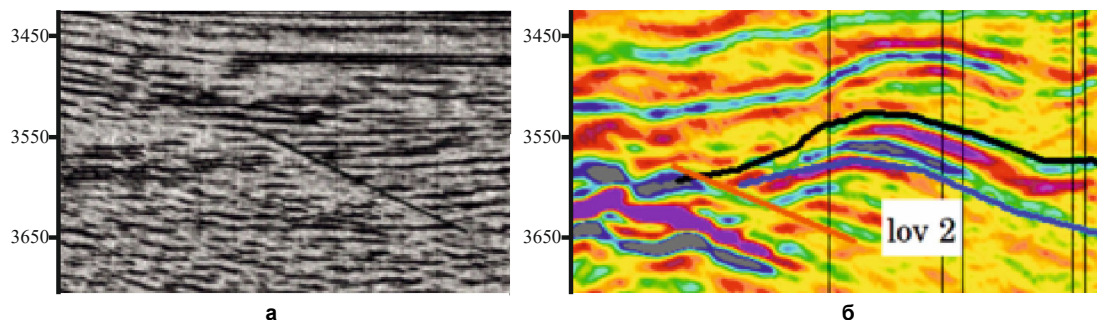


Рис. 5. Фрагмент временного разреза по линии 464

Заключение. Всесторонний анализ представленных годографов позволяет выявить следующие их свойства:

- при прохождении через базы приема сейсмических волн над нарушенной зоной годограф отраженной волны делится на два отрезка, имеющие разные кривизны и разные сдвиги во времени относительно друг друга (в зависимости от различия скоростных разрезов в ту или иную сторону от линии нарушения). Все это создает впечатление, что эти отрезки не относятся к одному и тому же годографу;
- неучет этого явления над нарушенной зоной приводит к тому, что оптимизация сумм по принадлежности к ОГТ (ОСТ) не дает желаемых результатов, корреляция сейсмических горизонтов ухудшается, и размеры зоны сложной сейсмической информации увеличиваются. Учет преломления восходящего луча отраженной волны на плоскости сбрасывателя нарушения позволяет уменьшить размеры этой зоны и провести уверенную корреляцию горизонтов.

Список использованных источников

- Ахмедов, Т.Р., Багиров, Н.О. (2010). Выявление и прослеживание разрывных нарушений сейсмическим атрибутивным анализом. *Geophysics News in Azerbaijan*, 3, 3–8.
- Корольков, Ю.С., Мушин, И.А., Чернов, А.А. (2001). Выявление и картирование дизъюнктивных дислокаций методами разведочной геофизики. Монография. М.: Науч. мир.
- Кушнарев, И.П. (1977). Методы изучения разрывных нарушений. Монография. М.: Недра.
- Личагина, Л.А., Судакова, В.В., Хасанов, Р.Н. (2009). Моделирование геологических объектов Уренского месторождения нефти на основе комплексного анализа материалов сейсморазведки и бурения. Получено с <http://www.oilnews.ru/>.
- Лавров И.В., Папухин, С.П. и др. (2017). Выявление дизъюнктивных нарушений комплексом геологических и геофизических методов с целью поиска ловушек нефти и газа. *Территория Нефтегаз*, 10, 38–45.
- Недосекин, А.С., Лукашов, А.В., Смирнов, О.А. и др. (2018). Выделение и трассирование дизъюнктивных дислокаций на базе сейсморазведки МОГТ-3D. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 10, 4–7.
- Charlotte, B., Nestor, C. et al. (2018). Seismic characterization of fault facies models. *Conference EGU General Assembly, Vienna*, 177.
- Marloes, K., Bastiaan, J. (2018). Improved definition of faults in the Groningen field using seismic attributes. *Netherlands Journal of Geosciences. Published online by Cambridge University Press: 17 January*, 96, 5, 7–85.
- Dave, H., Simon, L. (2012). 3D Seismic Image Processing for Faults and Horizons. *Telus Convention Centre – 8th Ave SE, Calgary*.
- Nur, Zulfa, Abdul, Kalid, Umar, Hamzah, Abdul, Rahim, Samsudin. (2016). Seismic attributes and their application in faults interpretation of Kupe Field, Taranaki Basin, New Zealand. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21, 2169–2184.
- Hale, D. (2013) Methods to compute fault images, extract fault surfaces, and estimate fault throws from 3D seismic images. *Geophysics*, 78, 2, O33–O43. DOI: 10.1190/geo2012-0331.1
- Luo, S., Hale, D. (2013). Unfaulting and unfolding 3D seismic images. *Geophysics*, 78, 4, O45–O56. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0350.1>
- Надійшла до редколегії 19.02.20**

T. Ahmadov, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
E-mail: akhmedov.tofik@bk.ru,
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

FORM OF SEISMIC HORIZON ON TIME SECTION AND REFLECTED WAVE COMMON SHOT POINT TRAVEL TIME CURVE IN TRANSITION ZONE FOR THE CASE OF COMPLICATION OF TARGET HORIZON COVER BY FAULT

The paper is devoted to study of reflection pattern (seismic horizon) and CSP travel time curve of reflected wave when the base of seismic oscillations receivers is within transition zone, i.e. the portion of base is in one flank while the other part is already in the next flank. The equation has been derived for travel time curve of zero-offset survey, i.e. reflection pattern) for the case when target horizon cover is complicated by fault. The other equation derived is the equation of travelttime curve of CSP of reflected wave, which upgoing rays are refracted on the fault line. For this, we have used the equation of travelttime curve of normal reflections refracted on the fault line.

Based on derived formulae we have calculated travelttime curves of CSP for various models of environment. Analysis of these models has shown that while passing through seismic waves receiver base over the faulted zone the travel time curve is divided into two cuts with differing curvature and various time offsets relative to each other depending on velocity section difference from the fault line leading to the impression that these two cuts are not the sections of the same travel time curve.

Keywords: seismic survey, disjunctive displacements, zero-offset survey travel time curve, Common Shot Point travel time curve, transition zone.

Т. Ахмедов, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: akhmedov.tofik@bk.ru,
Державний університет нафти і промисловості, м. Баку, Азербайджан

ФОРМА СЕЙСМІЧНОГО ГОРИЗОНТУ НА ЧАСОВОМУ РОЗРІЗІ Й ГОДОГРАФА ЗАГАЛЬНОЇ ТОЧКИ ВИБУХУ ВІДБИТОЇ ХВИЛІ В ПЕРЕХІДНІЙ ЗОНІ, КОЛИ СЕРЕДОВИЩЕ, ЯКЕ ПОКРИВАЄ ЦІЛЬОВИЙ ГОРИЗОНТ, УСКЛАДНЕНО ПОРУШЕННЯМ

Присвячено вивченню форм осі синфазності (сейсмічного горизонту) і годографа загальної точки вибуху (ЗТВ) відбитої хвилі, коли база прийому сейсмічних коливань перебуває в перехідній зоні, тобто частина бази є все ще в одному крилі, а інша частина переходить у наступне крило. Виведено рівняння годографа способу центральних променів (СЦП), тобто осей синфазності відображень, для випадку, коли середовище, яке покриває цільовий горизонт, ускладнено порушенням. Далі виведено рівняння годографів ЗТВ відбитої хвилі, висхідні промені якої переломлюються на лінії порушення. Для цього було використано рівняння годографа нормальних відображень, заломлених на лінії порушення.

Використовуючи виведені формули, були розраховані годографи ЗТВ для різних моделей середовища, аналіз яких показав, що при проходженні бази прийому сейсмічних хвиль над порушеною зоною годограф відбитої хвилі ділиться на два відрізки, що мають різні кривизни і різні зрушення у часі відносно один одного залежно від відмінності швидкісних розрізів у той чи інший бік від лінії порушення, і все це створює враження, що ці відрізки не належать до одного й того ж годографа.

Ключові слова: сейсмічна розвідка, диз'юнктивні дислокації, годограф СЦП, годограф ЗТВ, перехідна зона.