

РАСЧЕТ ГОДОГРАФА ТЫВЫ НА ОСНОВЕ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

Т. А. Тушко

Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
E-mail: TTushko@sfu-kras.ru

Представлены результаты расчета годографа первых вступлений P-волн для района Тывы на основе скоростной модели среды, полученной ранее исходя из данных сейсмической изученности Алтае-Саянской складчатой области. Приведено краткое описание блоково-слоистой модели земной коры и верхней мантии юга Красноярского края и Тывы. Рассмотрены ключевые формулы, лежащие в основе алгоритма расчета сейсмических лучей от приповерхностных и заглубленных источников в среде с линейной зависимостью скорости от глубины. Дан анализ волновой картины в предложенной модели среды. Приведено сравнение полученного годографа с экспериментальными данными и годографом, применяемым в регионе для обработки сейсмологических данных. Рассмотрен способ внесения стационарных поправок к годографу, учитывающих влияние низкоскоростных отложений под сейсмостанцией.

Ключевые слова: скоростная модель среды, годограф, сейсмический луч, рефрагированная волна, головная волна, гипоцентр, стационарная поправка.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 151–156CALCULATION OF THE HODOGRAPH FOR TIVA REGION
ON THE BASIS OF VELOCITY MODEL OF MEDIA

T. A. Tushko

Institute of space and information technology of Siberian Federal University
26, Kirenskogo St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: TTushko@sfu-kras.ru

The development of seismic network in Krasnoyarsk region and Tiva republic arouse the interest to earth crust structure model for local earthquake data processing. The seismic waves travel time hodograph as 1-dimensional model of media structure is widely used in seismological practice. In the present paper the results of calculation of the first arrival times of P-wave hodograph for Tiva region are presented. Calculations are based on the block-layered velocity model of media obtained earlier as a result of seismic research of Altay-Sayan folded area data. A brief description of earth crust and upper mantle velocity model for south part of Krasnoyarsk region and Tiva republic is given. The structure of Tiva block is supposed to be 3-layered with horizontal boundaries. Consolidated part of the earth crust is characterized by linear dependence of wave velocity on depth. Values of model parameters were obtained by averaging of DSS and CWME velocity curves. Analysis of the wave pattern in the framework of the media model is carried out. In the paper an algorithm to calculate of seismic rays from sources positioned in different depths within the earth crust is discussed. The algorithm is based on analytical solutions derived from the general formulation of the direct kinematic problem of seismology in the ray approximation. The refracted and head waves propagation in the environment model is considered. Resulted hodograph is compared to that applied recently to regional seismic data. Comparison of refracted P-wave hodograph allowed to reveal a systematic error due to a difference in the earth crust thickness. Comparison of refracted P-wave hodograph with experimental travel time catalogue from industrial explosion shows a good agreement. A way to insert station corrections into hodograph originated from low velocity sediments under the seismic stations is proposed. Obtained hodograph is offered to use in hypocenter location problems.

Keywords: velocity model of media, hodograph, seismic ray, refracted wave, head wave, hypocenter, stations correction.

Введение. В связи с развитием сети сейсмических наблюдений в сейсмоактивных районах Красноярского края и Тывы возрос интерес к моделированию скоростного строения земной коры и верхней мантии с целью обработки данных от местных землетрясений. Годограф, как дискретная модель среды, является

наиболее широко используемым одномерным способом ее представления. Однако систематические различия годографов объемных волн для различных регионов, указывающие на существование разнообразных неоднородностей в земной коре и верхней мантии, заставляют сейсмологов изучать их и моделировать для получения годографов, более соответствующих реальному строению среды.

Настоящая публикация является продолжением работы [1], где предложена блоково-слоистая модель скоростного строения среды на участке Алтае-Саянской складчатой области, охватывающем южную часть Красноярского края и Тыву, а также работы [2], в которой рассмотрены математическая постановка и алгоритм решения прямой задачи в предлагаемой скоростной модели среды. В данном исследовании ставилась задача расчета годографа, под которым подразумевается зависимость времени пробега сейсмической волны от эпицентрального расстояния, и глубины источника, выражаемая графически или таблично.

На основе решения прямой задачи в принятой скоростной модели земной коры для района Тывы был рассчитан и проанализирован годограф первых вступлений продольных волн.

Исходя из того, что большинство систем обработки данных в режиме реального времени используют в своей работе годографы, а не встроенные алгоритмы решения прямой задачи, расчет годографа даст возможность применить полученную ранее скоростную модель на практике, а также выполнить сравнение ее с другими одномерными моделями и оценить адекватность реальному строению среды.

Актуальность работы обусловлена слабой изученностью района Тывы при возрастающей сейсмической активности. Работа нацелена на повышение точности решения задач обращения наблюдаемых данных за счет уточнения представлений о среде.

Модель среды и анализ волновой картины. Для построения скоростной модели среды в работе [1] был выбран участок с координатами $\varphi = 49,5^\circ - 56,5^\circ N$ и $\lambda = 87^\circ - 99^\circ E$, включающий наиболее сейсмоактивную часть Красноярского края и Тыву. В работе приводится подробный анализ исходного экспериментального материала, полученного методами МОВЗ и ГСЗ, дано обоснование выбора типа модели, изложена методика количественной оценки описывающих ее параметров. За основу была взята блоково-слоистая модель, под которой подразумевается совокупность одномерных трехслойных моделей, каждая из которых задает скоростное строение в соответствующем блоке земной коры. Заметим, что модели подобного типа активно использовались в сейсмологии и ранее [3]. Исследуемая территория была разбита на 8 блоков. Итоговая скоростная модель была представлена картой с указанием границ блоков и таблицей со значениями параметров модели. По возможностям исходной информации полученная модель среды представляется оптимальной на текущем этапе исследований.

Глубинное строение земной коры в районе Тывы представлено в исходной модели [1] блоком 8 и частично блоками 5 и 7. Для предстоящих расчетов было выполнено осреднение их параметров пропорционально площади блоков. Кроме того, учитывая, что верхний низкоскоростной слой присутствует на исследуемой территории фрагментарно, было решено учесть его влияние путем расчета поправок к годографу, исключив из модели блока.

Таким образом, упрощенная модель среды в объединенном блоке Тывы (рис. 1) является одномерной, двухслойной, с горизонтальной границей раздела, расположенной на глубине h_2 и соответствующей границе Мохо. Скорость распространения упругих волн в верхнем слое аппроксимируется линейной функцией от глубины $v(z) = v_0 + \alpha \cdot z$, где $\alpha = \text{const}$, и включает в себя консолидированную часть коры. Второй слой, относящийся к верхней части мантии, характеризуется постоянной скоростью v_2 . Параметры верхнего слоя h_1 и v_1 предполагается использовать для расчета стационарных поправок к годографу только там, где установлено наличие низкоскоростных отложений.

Значения параметров скоростной модели среды в районе Тывы приведены в таблице.

В такой среде первое вступление продольной волны (P -волны) от землетрясения, зарегистрированного сейсмостанцией, может быть образовано либо рефрагированной в первом слое волной, либо головной волной от границы Мохо. Волна, отраженная от границы Мохо, не рассматривалась по ряду причин. Во-первых, на эпицентральных расстояниях от 0 до 160 км, где ее можно проследить, она приходит значительно позже рефрагированной, так как имеет более длинную траекторию. Во-вторых, для удалений более 160 км угол падения волны на границу превышает критическое значение, при котором наступает полное внутреннее отражение, и волна скользит вдоль границы. В-третьих, кратная отраженная волна значительно слабее других по амплитуде.

Ясно, что на близких эпицентральных расстояниях первой приходит рефрагированная волна. Протяженность годографа рефрагированной волны в расчетах ограничена глубиной погружения луча \hat{z} , она не должна превышать глубину границы Мохо Z_M , иначе луч выйдет за пределы линейного слоя. Как показали расчеты, глубина погружения лучевой траектории рефрагированной волны, зарегистрированной на удалении $D = 360$ км от источника на поверхности, составляет 49,15 км.

Расстояние выхода головной волны на дневную поверхность D зависит от глубины источника z_0 : чем глубже расположен источник, тем меньше эпицентральное расстояние. Головная волна начинает обгонять рефрагированную лишь на значительном удалении от эпицентра. Так, для случая $z_0 = 0$ эпицентральное расстояние, на котором первое вступление образовано головной волной, составляет около 270 км, для глубины источника $z_0 = 10$ км это расстояние равно 255 км.

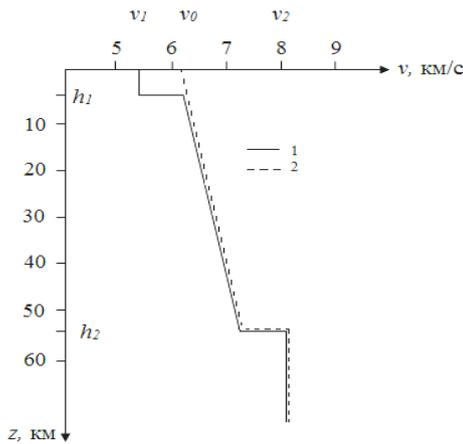


Рис. 1. Скоростная модель в блоке:
1 – базовая; 2 – упрощенная

Параметры модели

v_0	6,1
α	0,021
v_2	8,0
h_2	53
v_1	5,4
h_1	4

Алгоритм расчета годографа. Время распространения волны любого типа зависит от эпицентрального расстояния D , разделяющего источник и приемник, а также от положения источника по глубине z_0 .

Рассмотрим волну, рефрагированную в верхнем слое. Если источник расположен на поверхности $z_0 = 0$, то решение прямой задачи в среде с линейной зависимостью скорости от глубины $v(z) = v_0 + \alpha \cdot z$ выражается формулой Герглотца–Вихерта [4; 5]

$$T_{(M_0, M)} = \frac{2}{\alpha} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}}{p \cdot v_0} \right), \quad (1)$$

где M_0 – точка расположения источника; M – точка расположения приемника; p – лучевой параметр, являющийся константой для данного луча и равный $p = \sin e(z) / v(z)$; e – угол между лучом и вертикалью в точке среды на глубине z .

Для случая заглубленного источника решение зависит от формы лучевой траектории, соединяющей источник и приемник. На рис. 2 схематически изображены возможные положения источника на дуге луча: $M_0, M_{01}, M_{02}, M_{03}$. Случай, когда источник находится в точке M_0 , уже рассмотрен (1). Остальные обозначим как случаи 1, 2 и 3. Заметим, что M_{02} совпадает с точкой наибольшего погружения луча \hat{z} .

В первом случае решение задачи имеет вид

$$T_{(M_{01}, M)} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}) (1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)^2})}{p^2 \cdot v_0 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)}. \quad (2)$$

Во втором случае оно является частным случаем решения (1), так как точка наибольшего погружения луча M_{02} делит лучевую траекторию пополам и время движения по ней вдвое меньше $T_{(M_{02}, M)} = T_{(M_0, M)} / 2$.

В третьем случае решение имеет вид

$$T_{(M_{03}, M)} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}) (v_0 + \alpha \cdot z_0)}{v_0 \cdot (1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)^2})}. \quad (3)$$

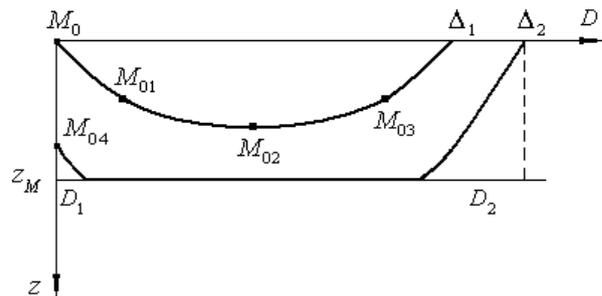


Рис. 2. Лучевые траектории: $M_0, M_{01}, M_{02}, M_{03}$ – возможные положения источника рефрагированной волны; M_{04} – источник головной волны; Δ_1, Δ_2 – положения приемника; Z_M – граница Мохо

В работе [2] предложен критерий, позволяющий однозначно идентифицировать форму лучевой траектории, соединяющей источник с приемником для заданных D и z_0 , и тем самым правильно применить формулы (1)–(3) в расчетах. Оценка лучевого параметра p , присутствующего в формулах, также зависит от типа траектории и является отдельной задачей, рассмотренной в работе [2]. Отметим, что решения (2) и (3) для заглубленного источника в явном виде в литературе не приводятся, их подробный вывод дан в работе [2].

Время распространения головной волны, которая схематически изображена на рис. 2 как траектория (M_{04}, Δ_2), рассчитывается как сумма времен движения

волны до границы T_1 , вдоль границы Мохо T_3 и от границы до приемника T_2 :

$$T_1 = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_0)^2}) \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_M)}{(v_0 + \alpha \cdot z_0) \cdot (1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_M)^2})}, \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{(1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}) \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_M)}{v_0 \cdot (1 + \sqrt{1 - p^2 \cdot (v_0 + \alpha \cdot z_M)^2})}, \quad (5)$$

где z_M – глубина до границы Мохо, вдоль которой происходит скольжение луча, образующее головную волну. Значение лучевого параметра в этом случае равно $p = 1/v_2$.

Время движения волны вдоль границы равно

$$T_3 = (D - D_1 - D_2) / v_2,$$

где D – эпицентральное расстояние между источником и приемником; D_1 – расстояние по горизонтали, пройденное лучом до падения на границу; D_2 – расстояние по горизонтали, пройденное лучом от границы до приемника.

Значения D_1 и D_2 ищутся также на основе известного решения для траектории [5]:

$$x_{(M_x, M_y)} = \int_{z_x}^{z_y} \frac{p \cdot v(z) \cdot dz}{\sqrt{1 - p^2 \cdot v^2(z)}}, \quad (6)$$

где M_x, M_y – точки среды; $x_{(M_x, M_y)}$ – расстояние между этими точками по горизонтали; z_x и z_y – глубина расположения этих точек.

Подчеркнем, что изложенный алгоритм расчета времен пробега волн не является численным, в отличие от алгоритмов, основанных на трассировании лучей. Поэтому его хорошо использовать в обратных задачах, требующих многократного вычисления прямой задачи, поскольку он основан на аналитических решениях, обладающих устойчивостью и не дающих большой погрешности в вычислениях.

Сравнение годографов. С целью оценки скоростной модели среды и рассчитанного по ней годографа было выполнено сравнение результатов расчетов с применяемыми в сейсмологической практике каталогами (годографами) времен пробега волн, а также с экспериментально полученными каталогами от промышленного взрыва на юге Красноярского края. Материалы для сравнения были предоставлены Центром сейсмического мониторинга ГПКК «КНИИГиМС» в г. Красноярске.

Таким образом, в работе рассматривались:

1. Годографы рефрагированной $T_{\text{реф}}$ и головной $T_{\text{гол}}$ P -волн, рассчитанные автором на основе описанной выше модели от источников на глубине 0, 10, 20, 30 км и для интервала удалений от 0 до 500 км с шагом 5 км.

2. Годографы P_g и P_n , применяемые в настоящее время в Красноярском крае для локализации землетрясений. Согласно принятым в сейсмологии обозначениям, P_g – это годограф P -волн, наблюдаемых в первых вступлениях от близких и местных землетрясений, P_n – это годограф объемных волн, распространяющихся вдоль границы Мохо. Эти годографы были рассчитаны С. И. Голенецким [6] для условий Байкальского региона.

3. Каталог времен пробега P -волн, полученный от искусственного источника и прослеживаемый на удалении от 0 до 130 км. Далее в тексте он будет называться T_{31} и T_{32} – соответственно ветвям экспериментального годографа.

4. Годограф Джеффриса–Буллена для осредненной модели Земли с шагом $0,5^\circ$.

Рассмотрим случай, когда источник расположен на глубине $z_0 = 0$.

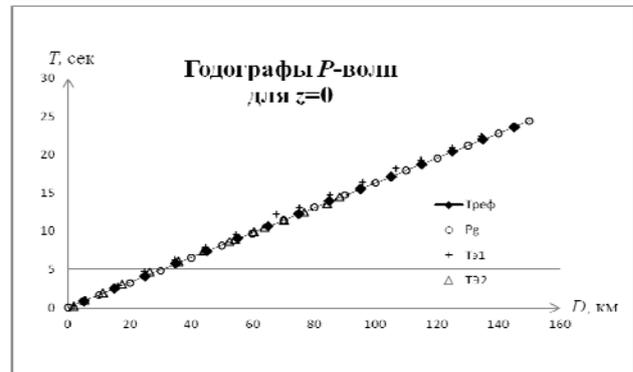


Рис. 3. Сравнение годографов от источника на глубине $z = 0$ км

На эпицентральных расстояниях от 0 до 150 км (рис. 3) наблюдается хорошее совпадение годографа рефрагированной волны $T_{\text{реф}}$ и годографа P_g . Расхождение в отдельных точках годографов $T_{\text{реф}}$ и P_g не превышает 0,05 с. Причем от 0 до 75 км $T_{\text{реф}}$ идет чуть выше P_g , а затем наоборот. Одна из ветвей экспериментального годографа T_{32} , наблюдаемая на расстояниях от 0 до 80 км, также очень хорошо согласуется с расчетным. Это указывает, прежде всего, на кинематическую эквивалентность моделей среды и их адекватность реальному строению до глубины примерно 10 км.

На эпицентральных расстояниях более 150 км расхождение между $T_{\text{реф}}$ и P_g начинает нарастать и к 250 км достигает 0,8 с. На расстояниях от 210 км и далее годограф рефрагированной волны $T_{\text{реф}}$ лежит ниже годографа P_g .

Годограф $T_{\text{гол}}$ головной волны от границы Мохо, выходящей на поверхность на $D > 160$ км, лежит выше годографа P_n на 1,65 с на всем протяжении. Последнее можно объяснить более глубоким залеганием границы Мохо в южной части Алтае-Саянской складчатой области примерно на 5–7 км по сравнению с Байкальским регионом, для которого и рассчитывался годограф P_n .

Следует отметить хорошее совпадение годографа P_n с годографом Джеффриса–Буллена, особенно на больших эпицентральных расстояниях, что указывает на подобие скоростных моделей среды, лежащих в их основе.

Для заглубленных источников картина несколько сложнее. На рис. 4 приведены годографы от источника, расположенного на глубине $z_0 = 10$ км.

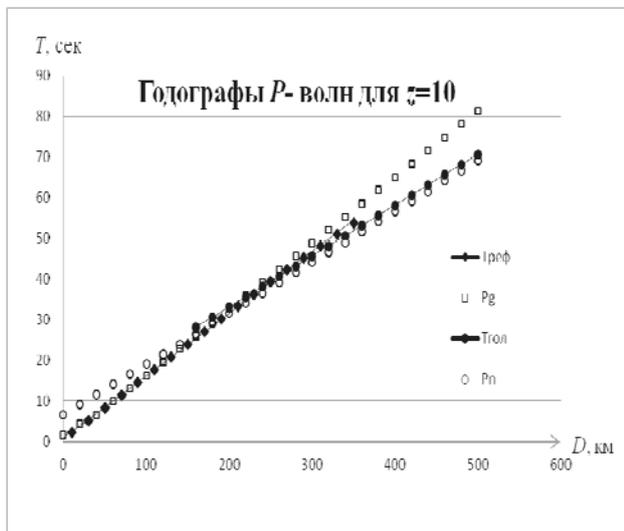


Рис. 4. Сравнение годографов от источника на глубине $z = 10$ км

Здесь также можно отметить хорошее совпадение на близких расстояниях годографа рефрагированной волны $T_{\text{реф}}$ и годографа P_g . На эпицентральных расстояниях от 30 до 130 км разница во временах вступления составляет менее 0,1 с, далее до 200 км – не превосходит 0,8 с. На расстоянии 350 км она уже составляет 3,1 с. Это говорит о разной природе волн, учитываемых при составлении сравниваемых годографов. На очень близких расстояниях от 0 до 30 км расхождение (до 0,6 с в отдельных точках) может быть объяснено разницей как в моделях, так и в алгоритмах расчета волн. Заметим, что эта разница имеет тот же порядок, что и возможная станционная поправка.

Годограф головной волны $T_{\text{гол}}$ лежит выше годографа P_n на 1,59 с, что вполне соответствует разнице в залегании границы Мохо, составляющей около 7 км.

Расчет станционных поправок. Если под станцией, зарегистрировавшей волну, есть осадочный низкоскоростной слой, то для нее можно рассчитать поправку, учитывающую эту особенность, не включенную в базовую модель среды. Поправка будет прибавляться к значению времени, снятого с годографа.

Пусть толщина осадков под станцией характеризуется мощностью h_1 и скоростью распространения в них упругих волн v_1 . Мы можем найти угол луча с вертикалью e , под которым волна проходит указанный слой: $\cos e = \sqrt{1 - p^2 \cdot v_0^2}$, где p – лучевой параметр:

$$p = 2 / \sqrt{4 \cdot v_0^2 + (D \cdot \alpha + \frac{z_0}{D} \cdot (2 \cdot v_0 + \alpha \cdot z_0))^2}.$$

Аппроксимируя траекторию луча в слое отрезком прямой длины $h_1 / \cos e$, рассчитаем значение станционной поправки по формуле:

$$DT = \frac{h_1 \cdot (v_0 - v_1)}{v_0 \cdot v_1 \cdot \cos e}. \quad (7)$$

В случаях, когда эпицентральное расстояние $D = 0$, луч направлен вертикально и $\cos e = 1$, формула (7) еще более упрощается. Если известно превышение станции над уровнем моря $h_{\text{ст}}$, можно учесть и его влияние, прибавив $h_{\text{ст}} / (v_1 \cdot \cos e)$ к DT .

Ясно, что в фиксированной модели среды поправка к годографу головной волны будет зависеть только от параметров осадочного слоя под конкретной станцией, поскольку угол подхода луча в этом случае не зависит от эпицентрального расстояния и глубины источника. Так, при $h_1 = 5$ км и $v_1 = 5,4$ км/с значение поправки составит менее 0,16 с.

Поправки же к годографу рефрагированной волны будут зависеть от всех параметров задачи. На рис. 5 приведены результаты расчета поправок к годографу рефрагированной волны как функции эпицентрального расстояния. Параметры среды в расчетах соответствуют таблице; глубина источника в первом случае равна 0, во втором случае – 10 км.

Для глубины $z = 0$ график начинается от 100 км. Это сделано неслучайно, так как для малых эпицентральных расстояний глубина погружения луча не превысит 4 км, что в данном случае менее толщины h_1 низкоскоростного слоя. Поэтому в случае малых эпицентральных расстояний и приповерхностного источника нужен другой алгоритм расчета поправок, основывающийся на более точных данных о строении верхней части разреза и учитывающий прямую волну, если источник находится в пределах того же низкоскоростного слоя.

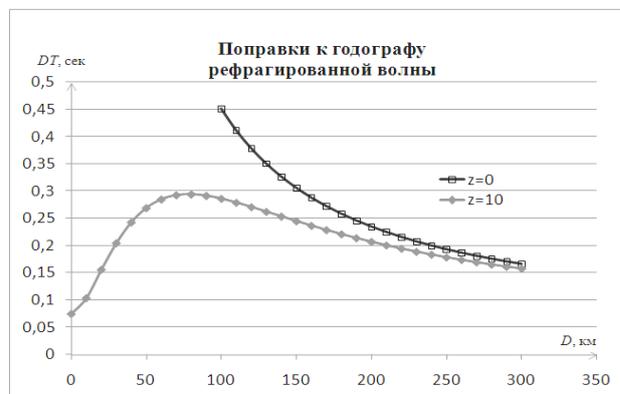


Рис. 5. Поправки к годографу от источников на глубине $z = 0$ и $z = 10$ км

Если источник заглублен более чем на 5 км, то поправка к годографу рефрагированной волны вначале растет, затем уменьшается обратно пропорционально

изменению угла подхода луча к границе низкоскоростного слоя, что и наблюдается на рис. 5, кривая $z = 10$ км.

Отметим, что в пределах рассматриваемой в работе площади, несколько превышающей административные границы Тывы, из десяти нанесенных на карту сейсмостанций, низкоскоростные отложения установлены только под станциями Кызыл (5 км), Тоджа (8 км), Чадан (5 км). Для каждой из них можно рассчитать и поставить в соответствие таблицы поправок к годографу в зависимости от удаленности и глубины гипоцентра.

Заключение. В работе дано описание скоростной модели среды и приведены основные расчетные формулы для решения прямой задачи в представленной модели.

Выполнен расчет годографа первых вступлений продольных волн для Тывы от источников на глубине 0, 10, 20, 30 км и для удалений от 0 до 500 км с шагом 5 км.

Изложена методика расчета станционных поправок, учитывающих строение среды под сейсмостанцией, проанализированы их возможные значения.

Дано сравнение полученного годографа с применяемым в регионе. Сравнение показало достаточно хорошее совпадение экспериментального годографа от промвзрыва и годографа P_g с годографом, рассчитанным автором на эпицентральных удалениях от 0 до 200 км, что подтверждает пригодность последнего к использованию для задач локации местных землетрясений. Сравнение годографа головной волны от границы Мохо с годографом P_n показывает, что последний содержит систематическую ошибку, связанную с разницей в глубине залегания границы Мохо для районов Тывы и Байкала, что делает предпочтительным использование годографа головной волны, рассчитанного автором.

Скоростная модель, на основе которой был рассчитан годограф, представляется оптимальной по возможностям исходной информации на данном этапе исследований, а полученные результаты дают основание считать скоростную модель строения среды достаточно конструктивной и заслуживающей дальнейшего развития.

Библиографические ссылки

1. Тушко Т. А., Осеев В. Г., Пилимонкин Н. С. Построение скоростной модели среды для решения задач

гипоцентрии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : материалы V Междунар. сейсмологической школы. Обнинск : ГС РАН. 2010. С. 209–214.

2. Тушко Т. А. Алгоритм расчета годографа для среды, содержащей слой с линейной зависимостью скорости от глубины // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 4(37). С. 97–101.

3. Кондорская Н. В., Тушко Т. А. Блоково-слоистая модель земной коры и определение гипоцентров землетрясений Каспийского моря // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1993. № 5. С. 17–23.

4. Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М. : ГИТТЛ, 1955.

5. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х т. М. : Мир, 1983. 872с.

6. Голенецкий С. И. Землетрясения в Иркутске. Иркутск, 1997.

References

1. Tushko T. A., Oseev V. G., Pilimonkin N. S. [Construction of velocity model for hypocenter location problem]. *Sovremennie metody obrabotki i interpretacii seismologicheskikh dannih*. [Modern methods of processing and interpretation of seismic data. Materials of 5th International Seismological Workshop]. Obninsk, GS RAN, 2010, p. 209–214. (In Russ.)

2. Tushko T. A. [Algorithm of calculation of the hodograph for media containing a layer with a linear dependence of velocity on depth]. *Vestnik SibGAU*. 2011, vol. 37, no. 4 (37), p. 97–101. (In Russ.)

3. Kondorskaya N. V., Tushko T. A. [Block-layered model of the earth crust and Caspian sea earthquake hypocenter location]. *Izv. AN SSSR, Physics of the Earth*, no. 5, 1993, p. 17–23. (In Russ.)

4. Savarensky E. F., Kirnos D. P. *Elementi seismologii i seismometrii* [Elements of seismology and seismometry]. Moscow, GITTL Publ., 1955. (In Russ.)

5. Aki K., Richards P. Quantitative seismology: theory and methods. In 2 v. San Francisco, W. H. Freeman and company, 1983, 872 p.

6. Golenetsky S. I. *Zemletryaseniya v Irkutsk*. [Earthquakes in Irkutsk]. Irkutsk, 1997.

© Тушко Т. А., 2014