

УДК 550.312

Программа обращения годографов рефрагированных и отраженных сейсмических волн, распространяющихся в вертикально-неоднородных упругих средах, для операционных систем MS DOS и MS Windows

© 2014 г. В.Ю. Бурмин¹, Нго Тхи Лы², Чан Вьет Фьонг²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт геофизики, Вьетнамская академия наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам*

Приведено описание программы обращения годографов сейсмических волн, распространяющихся в вертикально-неоднородных средах. Предложены две версии программы для операционных систем MS DOS и MS Windows. Дано подробное описание подготовки входных данных в обеих операционных системах.

Ключевые слова: обращение годографа, скоростная кривая, сейсмические волны.

Введение

Из многочисленных геофизических методов исследований Земли сейсмические методы, основанные на изучении распространения сейсмических волн в упругой среде, позволяют получать наиболее полные и детальные сведения о структуре геологических сред. Основными методами определения скоростей распространения сейсмических волн в Земле в настоящее время являются методы, основанные на анализе времен пробега сейсмических волн, в частности обращении сейсмических годографов.

Несмотря на то, что в настоящее время бурно развиваются методы численного решения обратных многомерных кинематических задач сейсмологии, или, как принято говорить, методы сейсмической томографии, определение скоростей распространения сейсмических волн в предположении об изменении скоростей только с глубиной остается весьма актуальным. Прежде всего это связано с тем, что задачи сейсмической томографии предполагают задание некоторого начального приближения скоростной модели среды. При этом, чем ближе начальное приближение к реальной модели среды, тем лучше сходимость решения в задаче томографии к окончательной модели. Кроме этого восстановление скоростных характеристик методом сейсмической томографии основывается, как правило, на использовании только рефрагированных волн и не дает возможности определять границы раздела в упругой среде. В то же время обращение годографов отраженных волн позволяет определять положение резких границ в среде и распределение скорости в классе монотонных скоростных функций.

Определение скоростей сейсмических волн в Земле основано главным образом на анализе времен пробега сейсмических волн, в частности обращении сейсмических годографов. Годографы представляют собой зависимость времен распространения упругих колебаний от эпицентральных расстояний (горизонтальный годограф) или от глубины источников и приемников (вертикальный годограф). Поскольку скорости распространения сейсмических волн в упругой среде определяют времена пробега колебаний от источников до приемников, то задачу нахождения скоростных характери-

стик среды можно рассматривать как задачу обращения совокупности сейсмических годографов.

В мировой практике для определения скорости распространения сейсмических волн используется или метод Герглотца–Вихерта [Herglotz, 1907; Wiechert, 1907], или приближенные численные методы, которые, как правило, требуют начального приближения (см. например, [Матвеева, Алексеев, 1964]). Решение во втором случае существенно зависит от выбранной начальной модели и далеко не всегда сходится к точному решению.

Метод Герглотца–Вихерта, как известно, основан на точных формулах обращения непрерывного сейсмического годографа рефрагированной волны и требует знания производной годографа. В общем случае задача обращения годографа распадается на две самостоятельные задачи. Первая – это вывод формул обращения, в общем случае, разрывных годографов рефрагированных и отраженных волн; вторая – это дифференцирование сейсмического годографа, заданного с погрешностями дискретным набором точек. Ни первая, ни вторая задачи в общем случае до работ одного из авторов настоящей статьи решены не были, впервые это сделано в работе [Бурмин, 1993].

В статье дается описание программы определения скоростной кривой по годографам, заданным в табличном виде, преломленных и отраженных волн, а также волн, распространяющихся вверх от глубинного источника для операционной системы MS Windows, созданной на основе написанной ранее, одним из авторов статьи, программы для операционной системы MS DOS.

Программа определения скоростной кривой по годографам преломленных и отраженных волн, а также волн, распространяющихся вверх от глубинного источника (INV1) для PC под MS DOS

Программа INV1 предназначена для построения скоростной кривой $V=V(Z)$ по годографам рефрагированных, головных, отраженных волн и волн, распространяющихся вверх от глубинного источника, полученных как при сухопутных, так и при морских наблюдениях. Результаты расчетов выдаются в графическом виде как на экране дисплея (программа INV1_VGA), так и в формате TIFF (программа INV1_TIF), а также в виде текстовых файлов. Решение задачи представляется в виде набора элементарных слоев с линейным изменением скорости в слое. Программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН-77, графический вывод на экран дисплея и на внешние графические устройства (принтер, графопостроитель) на графическом расширении ФОРТРАНа – ГРАФОРе. Программа работает под 32-разрядными операционными системами MS DOS и MS Windows. Решение задачи разбивается на три этапа. Первый – сглаживание сейсмических годографов выпуклыми кубическими сплайнами. Второй – построение скоростной кривой по сглаженному годографу. Третий – решение прямой кинематической задачи по полученной скоростной кривой и сравнение теоретического годографа с точками экспериментального годографа. Файл с исходными данными готовится в форматном виде, в котором каждая строка представлена в виде образа перфокарты, т.е. в каждой строке размещается 80 символов. Все расстояния задаются и выводятся в километрах (км), времена в секундах (с), а скорости в км/с.

В первой строке файла исходных данных в формате (19A4) набивается произвольная текстовая информация, например это может быть информация о месте и времени наблюдений и т.п. С 77 по 80 позиции формате I4 набивается число от 0 до 15 определяющее цвет фона экрана при графических построениях. Если задается 0, то фон черный, если 7, то фон белый.

Во второй строке в формате (4I4, 7F8.3, 2I4) вводятся данные общего характера. Число ветвей K в годографе рефрагированных волн. Предполагается, что годограф рефрагированных волн является разрывным. Разрывы годографа могут быть связаны с наличием в упругой среде скачков скорости, волноводов (слоев с пониженной скоростью), слоев с постоянной скорости (в том числе волноводов) [Бурмин, 1993]. Таким образом, годограф рефрагированных волн разбивается на ветви в соответствии с указанными особенностями распределения скорости распространения сейсмических волн.

Этот этап задания исходных данных, наиболее ответственный при определении скоростной кривой, является во многом неформальным и в значительной степени зависит от опыта интерпретатора. Здесь следует иметь в виду, что ветви годографов должны быть расположены таким образом, чтобы производная годографа рефрагированных волн от точки к точке и от ветви к ветви не возрастала (кажущаяся скорость не убывала). В противном случае на экран монитора выдается сообщение: «APPARENT VELOCITIES OF BRANCH $N-1$ MORE THAN APPARENT VELOCITIES OF BRANCH N . THERE IS NO ONE-DIMENSION MODEL FOR THIS TRAVEL-TIME CURVE».

Далее вводится признак задания рельефа морского дна. Необходимо при сейсмических исследованиях на море. Если признак задан, то автоматически вводятся временные поправки в годографы сейсмических волн за время пробега звуковых волн в воде с учетом рельефа дна и сейсмического сноса. Рельеф дна задается в отдельном файле (см. ниже).

Число слоев NL в скоростной колонке в верхней части скоростного разреза. Допускается, что распределение скорости в верхней части разреза уже известно. Такая ситуация возникает, например, в том случае, когда точки наблюдений расположены далеко друг от друга, а верхняя часть разреза известна и имеет небольшую мощность и малые значения скоростей или, когда наблюдения в непосредственной близости от источника отсутствуют, а верхняя часть скоростного разреза более или менее хорошо известна.

Признак задания системы координат. Возможны три варианта задания системы координат. Плоская задача, т.е. считается, что поверхности Земли плоская. Сферически симметричной Земли, но расстояния задаются в километрах. Сферически симметричная Земля, но расстояния задаются в градусах дуги большого круга.

Координаты пункта взрыва. Начало X -й координаты выбирается произвольно; ось Z направлена к центру Земли, ее начало находится на уровне моря. Источник сейсмических колебаний может располагаться как выше, так и ниже уровня моря. Если глубина источника неизвестна, то следует положить $Z_0=0$. Если глубина источника известна, то следует задать распределение скорости выше источника.

Координата точки перегиба годографа. Если источник расположен на поверхности Земли, то координата точки перегиба принимается равной начальной координате годографа. Если источник расположен на глубине и значение глубины неизвестно, то в этом случае определяется скоростная кривая над источником и, следовательно, глубина источника. При этом необходимо задать координату точки перегиба годографа, т.е. точки, в которой вторая производная годографа рефрагированной волны меняет знак. Как правило, координата этой точки не бывает известна и определение ее приходится делать путем подбора по значению невязки между точками сглаженного и наблюдаемого годографов и по оценке погрешности в определении глубины источника.

Скорость сейсмической волны на дневной поверхности $V_0=0$. Если эта скорость известна, то желательно ее задать, особенно при редком расположении точек наблюде-

ний. В этом случае лучше осуществляется процедура сглаживания годографа рефрагированной волны выпуклым кубическим сплайном. Если скорость на дневной поверхности неизвестна, то следует положить $V_0=0$.

V_R – скорость редукции для экспериментального годографа. Подразумевается, что наблюдаемые данные могут быть заданы в редуцированном масштабе. Если экспериментальный годограф не редуцированный, то следует положить $V_R=0$.

V_F – скорость редукции для выдачи данных (экспериментальных, сглаженных и теоретических годографов) на графику и в выходной файл. Если задается $V_F=0$, то автоматически $V_F=V_R$. Если $V_R=V_F=0$, то автоматически по умолчанию $V_F=8.0$.

Предусмотрен выбор способа обращения годографа. В зависимости от значения соответствующего параметра обращается только одно первое параметрическое уравнение годографа $X(p)$ или обращаются совместно два уравнения $X(p)$ и $T(p)$ в соответствии с методом наименьших квадратов.

Наконец, задается признак расчета годографов отраженных волн при решении прямой задачи. В зависимости от значения признака годографы отраженных волн или рассчитываются, или не рассчитываются.

В третьей строке в формате (6F8.3) задаются масштабы рисовки годографов.

В четвертой строке в формате (6F8.3) задаются масштабы рисовки скоростной кривой.

Далее следует говорить не о строках файла, а о пунктах задания данных, так как данные могут занимать не одну, а большее количество строк.

В пятом пункте задания данных в формате (20I4) вводится одномерный массив целых чисел $NR(j)$ ($j=1, 2, \dots, KR$), содержащий число точек в каждом годографе отраженных волн. Если массив не умещается в одной строке, то продолжение переносится на следующую строку и т.д. Всего в массиве должно быть $KR=2(K-1)$ элементов, т.е. в два раза больше, чем число разрывов в годографе рефрагированных волн. Дело в том, что с каждым разрывом годографа рефрагированной волны связывается два годографа отраженных волн, так как разрыв может быть обусловлен наличием в упругой среде слоя с постоянной скоростью со скачками скорости на верхней и нижней границах слоя (см. [Бурмин, 1993]). При этом скачки скорости могут быть как положительными, так и отрицательными (волноводы). Если какие-то годографы реально отсутствуют, то на соответствующие места вводятся нули. Если $K=1$, т.е. годограф рефрагированной волны состоит из одной ветви, то массив $NR(j)$, естественно, не вводится. Таким образом, годографы отраженных волн вводятся парами. При этом считается, что первый годограф соответствует отражению от верхней границы слоя и скорость в слое над границей аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Второй годограф соответствует отражению от подошвы слоя с постоянной скоростью, а скорость в слое аппроксимируется постоянной функцией. Здесь следует иметь в виду, что годографы отраженных волн должны располагаться таким образом, чтобы производные годографа отраженной волны были больше производных соответствующего годографа рефрагированной волны. В противном случае на экран выдается сообщение: «APPARENT VELOCITIES OF TRAVEL-TIME CURVE OF REFLECTED WAVE M LESS THEN APPARENT VELOCITIES OF BRANCH N OF TRAVEL-TIME CURVE OF REFRACTED WAVE. THERE IS NO ONE-DIMENSION MODEL FOR THESE TRAVEL-TIME CURVES». Производные годографов вычисляются с помощью выпуклых кубических сплайнов, аппроксимирующие экспериментальные точки годографов.

В шестом пункте задания в формате (10F8.3) вводится двумерный массив (X -я координата и время) годографов отраженных волн x_i, t_i ($i=1, 2, \dots, NR(j)$). При этом

$j=1, 2, \dots, KR$ и $KR=2(K-1)$. Причем каждый новый годограф начинается с новой строки. Всего вводится KR годографов отраженных волн.

В седьмом пункте основного входного файла в формате (20I4) вводится одномерный массив целых чисел $NT(j)$ ($j=1, \dots, K$), содержащий число точек в каждой ветви годографа рефрагированной волны. Если массив не умещается в одной строке, то продолжение переносится на следующую строку и т.д. Всего в массиве должно быть K элементов.

Отдельные или все ветви годографа могут быть пропущены (пустые ветви). В этом случае на соответствующих местах записываются нули. Если в качестве входных данных одновременно задаются непустые годографы отраженных и рефрагированных волн, то фактически решается задача комплексной интерпретации годографов рефрагированных и отраженных волн. Суть комплексной интерпретации заключается в следующем. По годографу рефрагированной волны слой за слоем, в соответствии с разбиением годографа на ветви, восстанавливается скоростная кривая (скоростная колонка) до некоторой глубины z . Если оказывается, что после очередной ветви годографа рефрагированной волны, а это может быть и первая ветвь в массиве $NR(j)$, на соответствующем месте задано отличное от нуля число точек в годографе отраженной волны, то скоростная кривая до границы достраивается по годографу отраженной волны. При этом ветвь годографа рефрагированной волны может быть пустой. И так слой за слоем, сверху вниз.

В восьмом пункте задания в формате (10F8.3) вводится двумерный массив (X -я координата и время) ветвей годографа рефрагированной волны x_i, t_i ($i=1, \dots, NT(j)$). Причем каждая новая ветвь годографа начинается с новой строки. Всего вводится K ветвей годографа рефрагированной волны.

Если задан признак задания рельефа дна, то девятым пунктом в формате (A12) вводится имя файла, содержащего рельеф дна. Структура этого файла следующая: в первой строке файла в формате (I4) вводится число NB задаваемых точек рельефа; со второй строки вводится двумерный массив значений координат рельефа дна (X -я координата и глубина) x_i, z_i ($i=1, \dots, NB$).

Если $NL>0$, то десятым пунктом вводится набор из NL строк. В каждой строке в формате (3F8.3) вводятся $H(i), V(i, 1), V(i, 2)$ ($i=1, \dots, NL$), где $H(i)$ – мощность i -го слоя; $V(i, 1)$ – скорость на верхней границе i -го слоя; $V(i, 2)$ – скорость на нижней границе i -го слоя.

В одиннадцатой строке в формате (I4) вводится признак окончания счета (KK). Если $KK=0$, то счет заканчивается. Если $KK=1$, то происходит возврат к первому пункту и счет продолжается для новых данных.

Входные данные можно подготовить в любом текстовом редакторе.

Результаты расчетов выводятся в виде графиков на экран монитора и записываются в текстовый файл под тем же именем но с расширением .OUT. Выходные данные в выходном файле представлены в виде двух таблиц в соответствии с первым и вторым этапами решения задачи.

Первая таблица состоит из восьми колонок, в которых записываются следующие данные: порядковый номер точки; X -я координата точки годографа; наблюдаемое время пробега сейсмической волны; сглаженное время; редуцированное наблюдаемое время; редуцированное сглаженное время; кажущаяся скорость сейсмической волны в точке; вторая производная годографа. Анализ значений второй производной годографа рефрагированной волны помогает выявить точки излома годографа и правильно разбить годограф на отдельные ветви.

Вторая таблица содержит девять колонок, в которых представлены следующие данные: порядковый номер точки; половина эпицентрального расстояния; сглаженное время распространения сейсмической волны; $t_0 = t_i - x_i/v_R$; средняя скорость распространения сейсмической волны по лучу; скорость на верхней границе элементарного слоя; скорость на нижней границе элементарного слоя; глубина нижней границы элементарного слоя; мощность элементарного слоя.

Кроме основного выходного файла выводятся также файлы с годографами и скоростной кривой, подготовленные для графического пакета GRAFER.

Для расчета скоростной кривой запускается исполняемый файл INV1_VGA.EXE (для вывода графики в формате TIFF – INV1_TIF.EXE). Для удобства программу можно запускать вместе с файлом данных в командной строке. Например: INV1_VGA.EXE NAME.INV.

Оценка качества решения обратной задачи осуществляется путем сравнения теоретических годографов с экспериментальными данными. Для этого по полученной скоростной кривой производится расчет прямой кинематической задачи. Полученные теоретические годографы накладываются на точки экспериментального годографа или на соответствующий монтаж сейсмограмм в формате SEG_Y.

По окончании счета выдаются шесть файлов. Помимо файла с расширением .OUT, содержащий информацию о годографах и скоростной кривой, файл с расширением .ANG содержит углы выхода сейсмических лучей для ориентировки трехкомпонентных записей по лучу. Два файла TMEi.DAT и TMSi.DAT, содержащие наблюденный и теоретический годографы. Два файла VZi.DAT и UZi.dat, одержащие две скоростные кривые (в случае волновода определяются два решения).

На рис. 1–3 представлены графики с входными данными, результатом определения скоростной кривой и теоретический годограф, посчитанный по полученной скоростной модели.

Несмотря на то, что, программа INV1 работает стабильно и не имеет аналогов в мировой практике, в настоящее время возникла необходимость адаптировать ее для PC под операционную систему Windows.

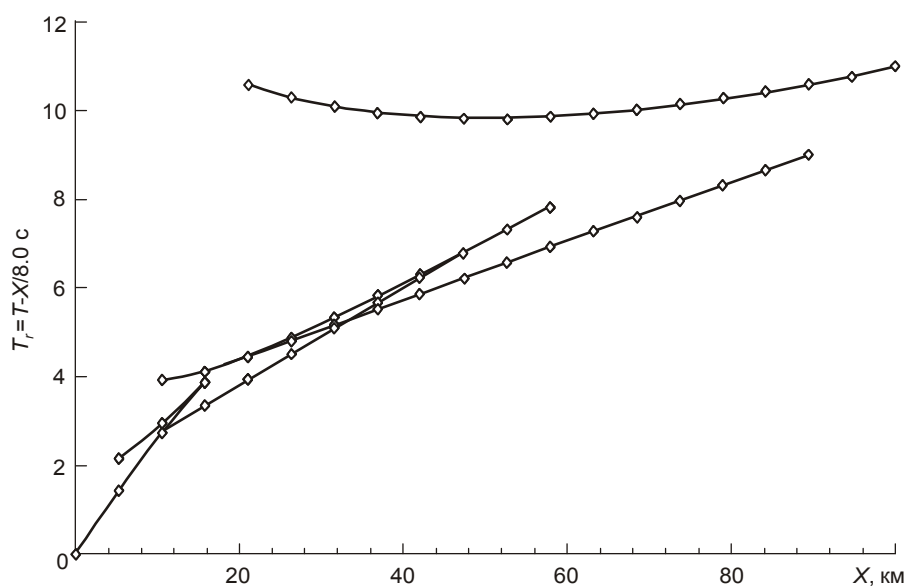


Рис. 1. Точки экспериментального годографа и сглаживающий сплайн

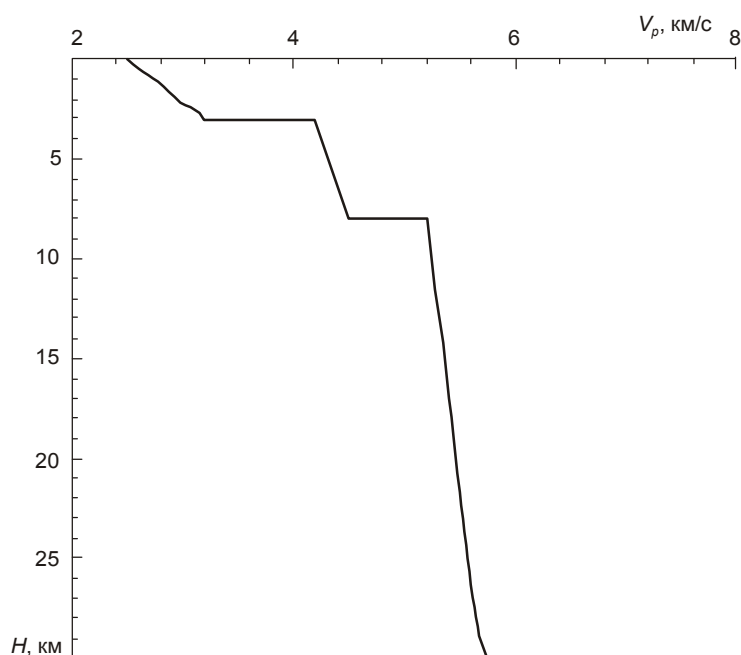


Рис. 2. Скоростная кривая

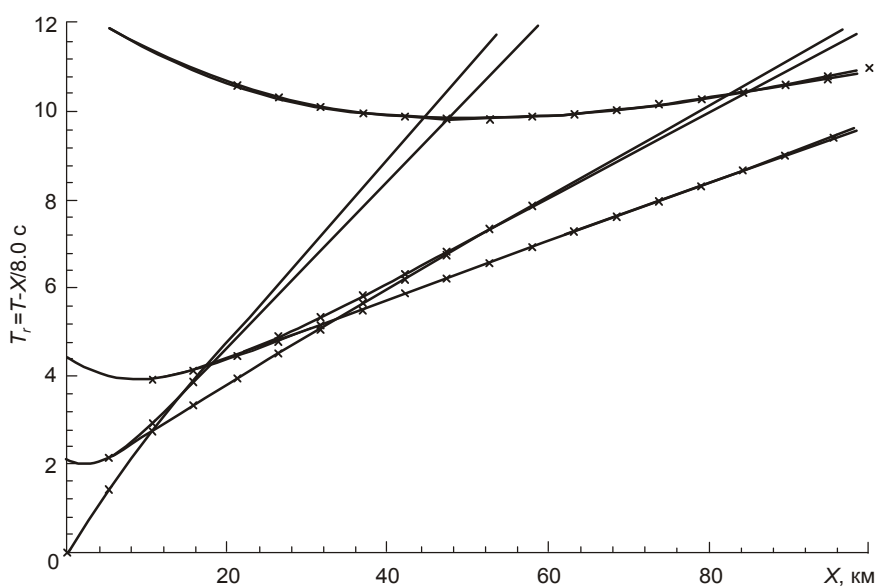


Рис. 3. Точки экспериментального годографа и теоретический годограф, рассчитанный по полученной скоростной кривой

Работа программы INV1 в среде MS Windows

Для работы с программой INV1 на PC в 32-разрядной среде MS Windows создан простой и дружелюбный интерфейс на языке C# в понятном графическом виде. В дальнейшем будем называть эту программу INV1_Win. Интерфейс программы трехязычный – английский, русский и вьетнамский. На рис. 4 представлен русскоязычный вариант интерфейса. Рассмотрим назначение окон и кнопок интерфейса.

1 – выбор имени файла исходных данных. При работе с данными заданными в различных форматах данные конвертируются в рабочий формат.

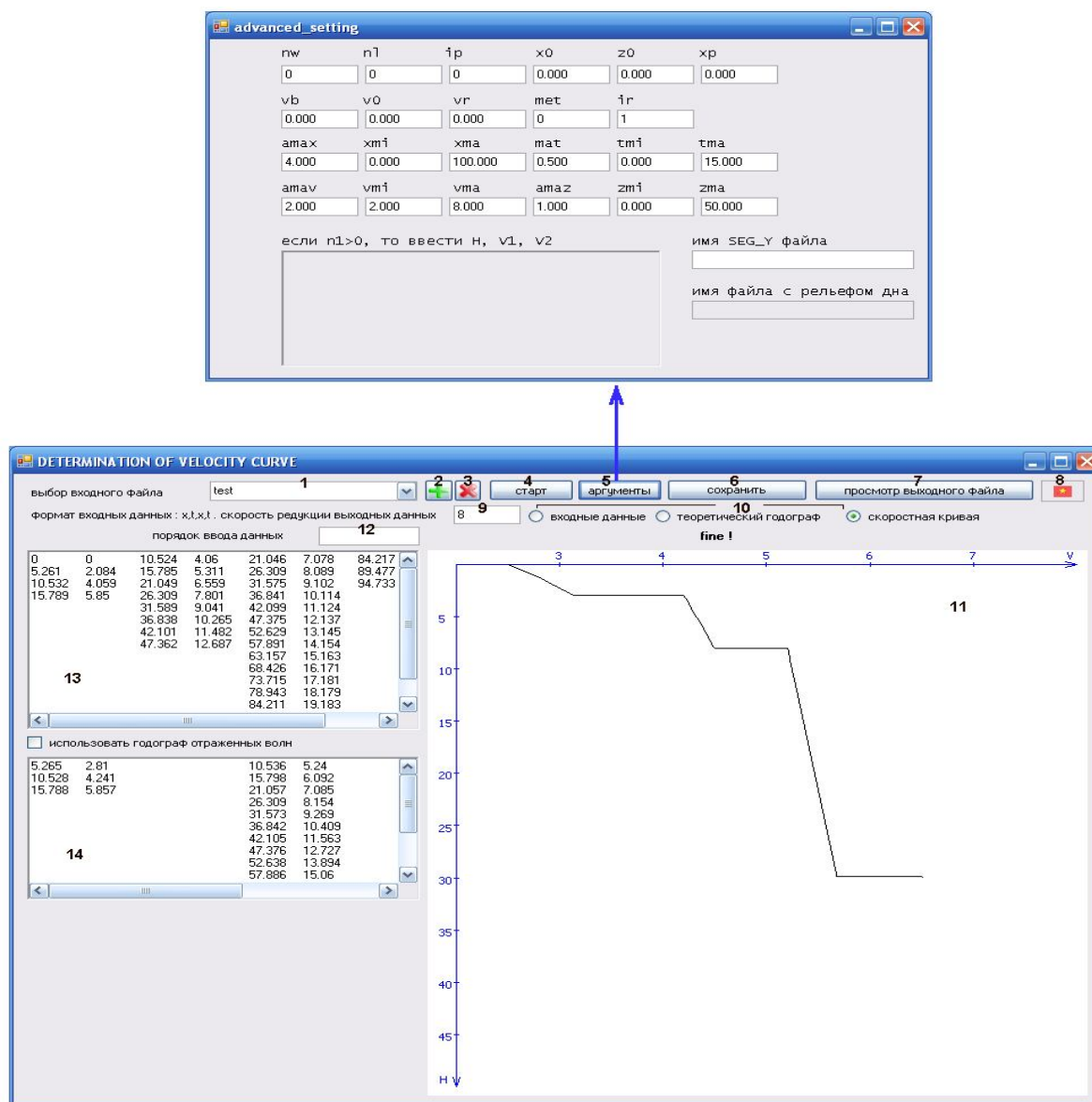


Рис. 4. Интерфейс программы INV1_Win

- 2 – возможность добавления новых данных к входному файлу.
- 3 – удаление входного файла.
- 4 – обработка входных данных (счет).
- 5 – задание вспомогательных параметров и параметров рисовки годографов и скоростной кривой во всплывающем окне.
- 6 – сохранение на жестком диске результатов счета в графической форме в формате *.png.
- 7 – открытие выходного текстового файла, включающего в себе результаты аппроксимации экспериментального годографа и собственно полученную скоростную колонку.
- 8 – значение скорости редукции (V_F) с которой необходимо выдать годографы на графике. По умолчанию $V_F=8.0$ км/с.
- 9 – кнопка смены языка интерфейса (английский–русский–вьетнамский).
- 10 – кнопки просмотра исходных данных и результатов счета в графическом виде.

11 – в этом окне отображается результат программы – наблюдаемые годографы, теоретические годографы по полученной скоростной кривой, скоростная кривая.

12 – в этом поле задается порядок считывания пар столбцов в таблице (13), в том случае если порядок задания ветвей годографа произвольный.

13 – таблица значений годографа рефрагированных волн (X_i, T_i). Каждая пара столбцов таблицы отвечает соответствующей ветви годографа. Возможно задание соответствующего количества пустых столбцов, если обрабатываются только годографы отраженных волн. Эти данные могут быть изменены в “Excel” и скопированы из “Excel” в таблицу 13 и обратно.

14 – таблица значений годографа отраженных волн (X_i, T_i). Каждая пара столбцов таблицы отвечает соответствующему годографу. Если какие-либо годографы не заданы, то соответствующие столбцы остаются пустыми. Эти данные могут быть изменены в “Excel” и скопированы из “Excel” в таблицу 14 и обратно. При этом годографы отраженных волн можно исключать из счета или подключить к счету.

Работа с программой:

Первый шаг. Подготовка исходных данных годографа рефрагированных волн в табличном виде в формате “Excel”. Каждая пара столбцов в таблице соответствует определенной ветви годографа. Причем первый столбец в каждой паре соответствует эпицентральному расстояниям, а второй – временам пробега сейсмических волн (рис. 5). После того, как таблица сформирована, соответствующие столбцы выделяются и копируются в окно 11 ввода данных.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	X	T	X	T	X	T		
2	60.5	16.7616	44	12.5	211.2	55		
3	69.3	21.168	60.5	16.7616	212.3	55.5552		
4	86.9	24.3648	86.9	24.3648	221.1	56.3328		
5	102.3	29.2896	117.7	32.4	226.6	60.5664		
6	107.8	30.4128	133.1	35.856	229.9	60.5664		
7	113.3	32.0544	165	44.6688	266.2	67.392		
8	117.7	32.4	167.2	45.1872	266.2	65.68128		
9	129.8	36.8928	168.3	42.30144	284.9	70.6752		
10	132	37.7568	172.7	46.4832	286	72.7488		
11	133.1	39.4848	174.9	44.91072	293.7	72.3168		
12	155.1	43.0272	178.2	47.952	298.1	75.2544		
13	172.7	47.52	196.9	48.9024	303.6	75.0816		
14	188.1	52.38432	198	49.7664	319	79.3152		
15	205.7	60.48	202.4	50.4576	385	93.5712		
16	222.2	63.62496	205.7	54.9504	445.5	105.1488		
17	223.3	64.8864	211.2	54.1728	451	107.136		
18	240.9	69.4656	212.3	55.5552	464.2	110.7648		
19	275	76.8096	221.1	56.3328	504.9	120.096		
20	284.9	82.8576	229.9	60.5664	533.5	125.7984		
21	289.3	83.376	266.2	67.392	566.5	132.2784		
22	345.4	98.3232	268.4	70.416	568.7	132.7968		
23	408.1	116.208	286	72.7488	591.8	138.1536		
24	680.9	195	298.1	75.2544	597.3	139.6224		
25			337.7	88.2144	616	146.88	err	err
26			396	101.088	634.7	150.0768	err	err
27			541.2	137.4624	639.1	151.2	err	err
28			573.1	146.7936	678.7	159.0624	err	err
29			605	154.7424	743.6	172.8864	err	err
30			683.1	175.6512	764.5	178.3296	err	err
31			684	175	788.7	184	err	err
32							err	err
33							err	err

Рис 5. Пример подготовка исходных данных для программы

Аналогичным образом поступаем с годографом отраженных волн, но таблицу копируем в окно 12.

Второй шаг. Открытие программы определения скоростной кривой и вставка скопированных данных в окне 11 с сочетанием клавиш «Ctrl + V» или «Shift + Ins».

Третий шаг. Открываем окно 5 и заполняем таблицу вспомогательных параметров (см. рис. 4).

Четвертый шаг. В окне 9 вводим значение скорости редукиции для рисовки входных данных. По умолчанию скорость редукиции отрисовки годографов задается равной $V_F = 8$ км/с.

Пятый шаг: для начала счета нажимаем кнопку «старт».

Шестой шаг: для просмотра результатов работы программы нажимаем кнопки 10. Для сохранения каждого рисунка в графическом виде следует нажать кнопку 6. Для просмотра результатов работы программы в текстовом виде, необходимо нажать кнопку 7. Результаты вычислений выдаются в виде таблиц (рис. 6, 7).

Программы INV1_VGA и INV1_TIF можно скачать с сайта ИФЗ РАН по адресу: <http://www.ifz.ru/burmin/>.

```

test inv1
K= 4 NW= 0 NL= 0 IP= 0 X0= .000 Z0= .000 XP= .000
VB= .00 V0= .00 VR= .00 VF= 8.00 MET=0 IR=1
4.000 .000 100.000 .500 .000 15.000
2.000 2.000 8.000 1.000 .000 50.000
REDUCTION VELOCITY 8.000
APPROXIMATION OF TRAVEL-TIME CURVE OF REFLECTED WAVE 1
N.T. X T T APX. TR TR APX. DX/DT D2T/DX2
1 5.26 2.81 2.81 2.15 2.15 4.12 .01343
2 10.53 4.24 4.24 2.93 2.93 3.38 .00671
3 15.79 5.86 5.86 3.88 3.88 3.19 .00000
S= .0000
APPROXIMATION OF TRAVEL-TIME CURVE OF REFLECTED WAVE 3
N.T. X T T APX. TR TR APX. DX/DT D2T/DX2
4 10.54 5.24 5.24 3.92 3.92 6.95 .00769
5 15.80 6.09 6.09 4.12 4.12 5.63 .00511
6 21.06 7.09 7.09 4.45 4.45 5.06 .00254
7 26.31 8.15 8.15 4.87 4.87 4.80 .00153
8 31.57 9.27 9.27 5.32 5.32 4.66 .00077
9 36.84 10.41 10.41 5.80 5.80 4.59 .00057
10 42.10 11.56 11.56 6.30 6.30 4.54 .00026
11 47.38 12.73 12.73 6.81 6.81 4.52 .00019
12 52.64 13.89 13.89 7.31 7.31 4.50 .00007
13 57.89 15.06 15.06 7.82 7.82 4.50 .00000
S= .0000
APPROXIMATION OF TRAVEL-TIME CURVE OF REFLECTED WAVE 5
N.T. X T T APX. TR TR APX. DX/DT D2T/DX2
14 21.05 13.21 13.21 10.58 10.58 15.26 .00291
15 26.31 13.59 13.59 10.30 10.30 12.52 .00253
16 31.59 14.05 14.05 10.10 10.10 10.85 .00215
17 36.84 14.56 14.56 9.96 9.96 9.69 .00203
18 42.11 15.13 15.13 9.87 9.87 8.85 .00168
19 47.36 15.75 15.75 9.83 9.83 8.23 .00156
20 52.64 16.41 16.41 9.83 9.83 7.76 .00126
21 57.89 17.10 17.10 9.87 9.87 7.40 .00113
22 63.16 17.83 17.83 9.93 9.93 7.11 .00092
23 68.42 18.58 18.58 10.03 10.03 6.88 .00090
24 73.69 19.36 19.36 10.15 10.15 6.69 .00067
25 78.95 20.16 20.16 10.29 10.29 6.53 .00070
26 84.20 20.97 20.97 10.44 10.44 6.40 .00045
27 89.47 21.80 21.80 10.61 10.61 6.30 .00047
28 94.74 22.64 22.64 10.80 10.80 6.20 .00051
29 100.00 23.49 23.49 10.99 10.99 6.15 .00000
S= .0000
APPROXIMATION OF TRAVEL-TIME CURVE OF REFRACTED WAVE
BRANCH OF TRAVEL-TIME CURVE 1
N.T. X T T APX. TR TR APX. DX/DT D2T/DX2

```

Рис. 6. Пример выходного текстового файла (фрагмент таблицы 1)

out_test0.txt - Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

VELOCITY CURVE

N. BD.	X0+DX/2	T APX	T0	V. AV.	V1	V2	H	DH
1	.00	.00	.00	2.50	2.50	2.50	.00	.00
2	2.63	2.08	.04	2.54	2.57	2.57	.30	.30
3	5.27	4.06	.31	2.65	2.81	2.81	1.28	.98
4	7.89	5.85	.59	2.76	3.00	3.00	2.27	.98
5	.00	2.12	2.12	2.76	3.00	3.00	2.27	.00
6	2.63	2.81	1.53	2.77	3.07	3.07	2.40	.13
7	5.26	4.24	1.13	2.80	3.13	3.13	2.63	.23
8	7.89	5.86	.91	2.84	3.19	3.19	3.01	.38
9	5.26	4.06	1.56	2.84	3.19	4.20	3.01	.00
10	7.89	5.31	1.56	2.88	4.21	4.21	3.15	.14
11	10.52	6.56	1.58	2.95	4.23	4.23	3.42	.27
12	13.15	7.80	1.60	3.03	4.25	4.25	3.75	.33
13	15.79	9.04	1.65	3.13	4.27	4.27	4.20	.45
14	18.42	10.27	1.71	3.23	4.30	4.30	4.74	.54
15	21.05	11.48	1.80	3.34	4.35	4.35	5.44	.70
16	23.68	12.69	1.86	3.41	4.38	4.38	5.94	.50
17	.00	4.42	4.42	3.41	4.38	4.38	5.94	.00
18	5.27	5.24	3.72	3.43	4.39	4.39	6.12	.18
19	7.90	6.09	3.29	3.45	4.40	4.40	6.31	.19
20	10.53	7.09	2.92	3.47	4.41	4.41	6.50	.19
21	13.15	8.15	2.67	3.50	4.42	4.42	6.70	.20
22	15.79	9.27	2.50	3.52	4.44	4.44	6.90	.20
23	18.42	10.41	2.38	3.54	4.45	4.45	7.11	.21
24	21.05	11.56	2.29	3.56	4.46	4.46	7.32	.21
25	23.69	12.73	2.24	3.58	4.47	4.47	7.54	.22
26	26.32	13.89	2.21	3.60	4.49	4.49	7.76	.23
27	28.94	15.06	2.20	3.62	4.50	4.50	8.00	.23
28	10.52	7.08	3.03	3.62	4.50	5.20	8.00	.00
29	13.15	8.09	3.03	3.62	5.20	5.20	8.00	.00
30	15.79	9.10	3.03	3.62	5.20	5.20	8.00	.00
31	18.42	10.11	3.03	3.63	5.20	5.20	8.05	.05
32	21.05	11.12	3.04	3.65	5.21	5.21	8.21	.17
33	23.69	12.14	3.04	3.67	5.21	5.21	8.39	.18
34	26.31	13.15	3.05	3.70	5.21	5.21	8.55	.16
35	28.95	14.15	3.06	3.71	5.22	5.22	8.69	.14
36	31.58	15.16	3.07	3.75	5.22	5.22	8.98	.29
37	34.21	16.17	3.09	3.79	5.23	5.23	9.39	.41
38	36.86	17.18	3.11	3.82	5.24	5.24	9.62	.24
39	39.47	18.18	3.12	3.84	5.24	5.24	9.82	.20
40	42.11	19.18	3.15	3.89	5.25	5.25	10.31	.49
41	44.74	20.18	3.17	3.92	5.26	5.26	10.65	.34

Стр 1, стлб 1

Рис. 7. Пример выходного текстового файла (фрагмент таблицы 2)

Литература

- Бурмин В.Ю. Методы численного обращения годографов сейсмических волн. М.: Наука, 1993. 112 с.
- Матвеева Н.Н., Алексеев А.С. Машинный поиск вариантов скоростного разреза верхней мантии по совокупности годографов глубокофокусных землетрясений // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Наука, 1964. Вып. 7. С.130–144.
- Herglotz G. Uber das benndorfsche problem der fortpflanzungsgeschwindigkeit der erdbebenstrahlen // Phys. Zeitschr. 1907. V. 8, N 5. P.145–147.
- Wiechert E. Eber Erdbebenwellen. 1. Theoretisches eber die Ausbreitung der Erdbebenwellen // Math. Phys. 1907. N 4. P.415–529.

Сведения об авторах

БУРМИН Валерий Юрьевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495)-254-68-95. E-mail: burmin@ifz.ru

НГО ТХИ ЛЫ – доктор физико-математических наук, Институт геофизики Вьетнамской академии наук и технологий, Вьетнам, Ханой, ул. Хоан Куок Вьет, д. 18. Тел.: (844)-836-32-37. E-mail: ngothiluigp@gmail.com

ЧАН ВЬЕТ ФЬОНГ – магистр, Институт геофизики Вьетнамской Академии наук и технологий, Вьетнам, Ханой, ул. Хоан Куок Вьет, д. 18. Тел.: (844)-836-32-37. E-mail: tranvietphuong1985@gmail.com

A program of inversion of refracted and reflected seismic waves propagating in a vertically inhomogeneous elastic media under operating systems DOS and Windows

V.Yu. Burmin¹, Ngo Thi Lu², Tran Viet Phuong²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Institute of Geophysics of Vietnamese Academy of Science and technology, Hanoi, Vietnam*

Abstract. The article describes a program of inversion travel-times of seismic waves propagating in a vertically inhomogeneous media. We propose two versions for operating systems DOS and Windows. Detailed descriptions of the preparation of the input data in both operating systems are given.

Keywords: inversion travel-time, velocity curve, seismic waves.