



**Обработка данных, полученных по методу многоканального
анализа поверхностных волн (MASW) в программе RadExPro –
практическое руководство (редакция 15.05.2012)**

ООО «Деко-геофизика СК»
Ул. Вавилова 57А
Москва, Россия
Тел./Факс: (+7 495) 987 22 47
E-mail: support@radexpro.ru
Интернет: www.radexpro.ru

Оглавление

Введение	3
Ввод данных, присвоение геометрии	4
Создание проекта в RadExPro	4
Загрузка исходных данных в проект	6
Работа с модулем MASW	15
Задание схемы обработки	15
Расчет дисперсионных изображений	16
Процедура инверсии	23
Приложение	30

Введение

Данное руководство предназначено для пользователей, начинающих обрабатывать данные, полученные по методу многоканального анализа поверхностных волн, в программе RadExPro. Рассматриваются все стандартные этапы построения вертикального профиля поперечных скоростей – загрузка данных, ввод геометрии, расчет дисперсионных изображений, инверсия дисперсионных кривых.

Теоретические основы метода многоканального анализа поверхностных волн могут быть найдены в следующих источниках:

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves: Geophysics, v. 64, n. 3, pp. 800-808

Lai, G., Rix, J., 1998, Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization, National Science Foundation and U.S. Geological Survey

Haskell, N. A. 1953, The dispersion of surface waves on multilayered media, Bull. Seismological Soc. of Am., v. 43, n. 1, p. 17-34.

Dal Moro, G., Pipan, M., Forte, E., Finetti, I., 2003, Determination of Rayleigh wave dispersion curves for near surface applications in unconsolidated sediments, Expanded Abstract, Society of Exploration Geophysicists, p. 1247-1250.

Foti, S., 2000, Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves: PhD thesis, Politecnico di Torino, Italy.

Вся обработка проводится на примере реальных данных, которые можно загрузить с нашего сайта: <http://radexpro.com/site/files/tutorials/MASWInpData.zip>

В архиве содержатся исходные данные для работы: фрагмент наземного профиля, выполненного по методу многоканального анализа поверхностных волн – файл в формате Seg-у с семью пунктами возбуждения.

Кроме того, вы можете загрузить готовый проект, получающийся в результате выполнения всех шагов, описанных в руководстве: http://radexpro.com/site/files/tutorials/MASW_project.zip

Ввод данных, присвоение геометрии

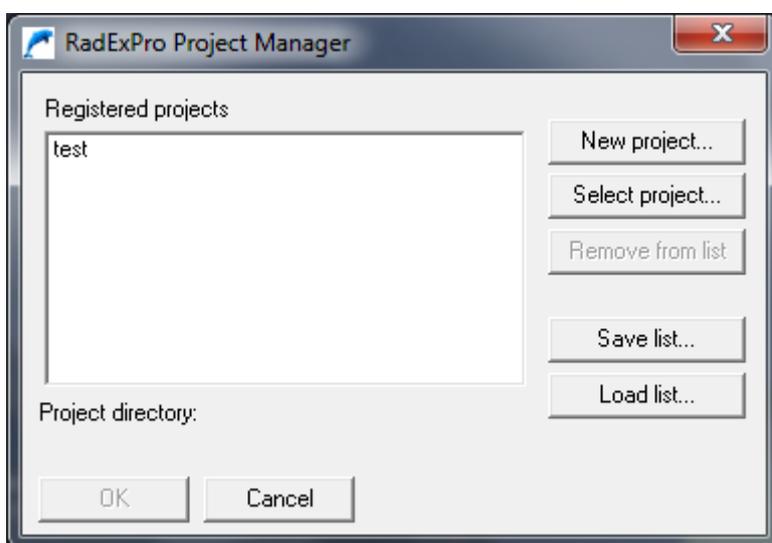
Создание проекта в RadExPro

Вся обработка данных метода поверхностных волн в программе RadExPro производится в рамках проектов. Проект – это совокупность исходных данных, промежуточных и окончательных результатов обработки, потоков обработки, организованных в единую базу данных, используемую пакетом обработки сейсмических данных RadExPro. Проекты хранятся в отдельных папках на диске, папка для проекта создается автоматически при создании проекта.

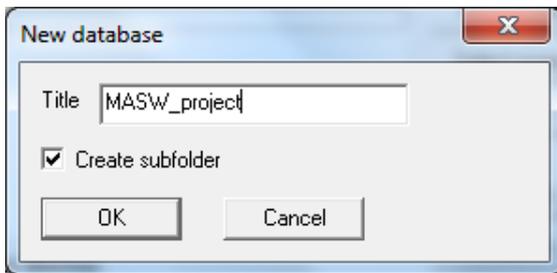
Проект можно переносить с компьютера на компьютер простым копированием папки (при условии, что все используемые данные хранятся внутри этой папки). Создадим новый проект обработки. Запустите программу через меню Пуск или иконку на рабочем столе:



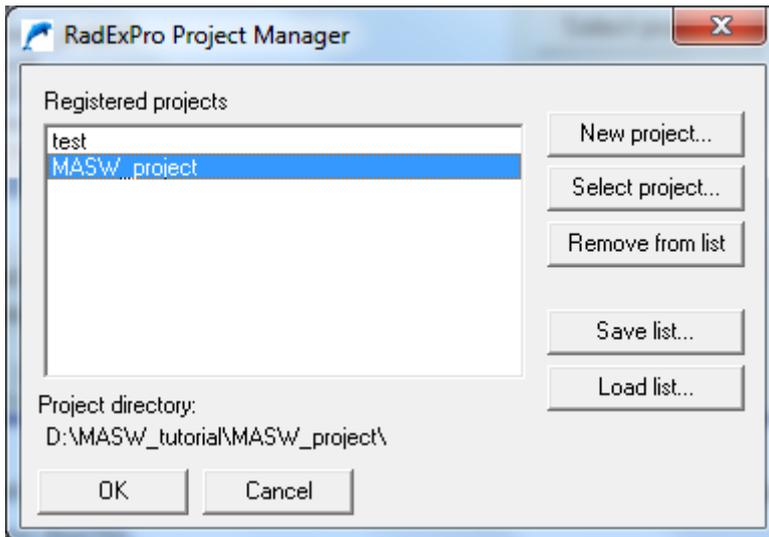
Появится менеджер проектов. При этом откроется диалоговое окно, содержащее список зарегистрированных проектов:



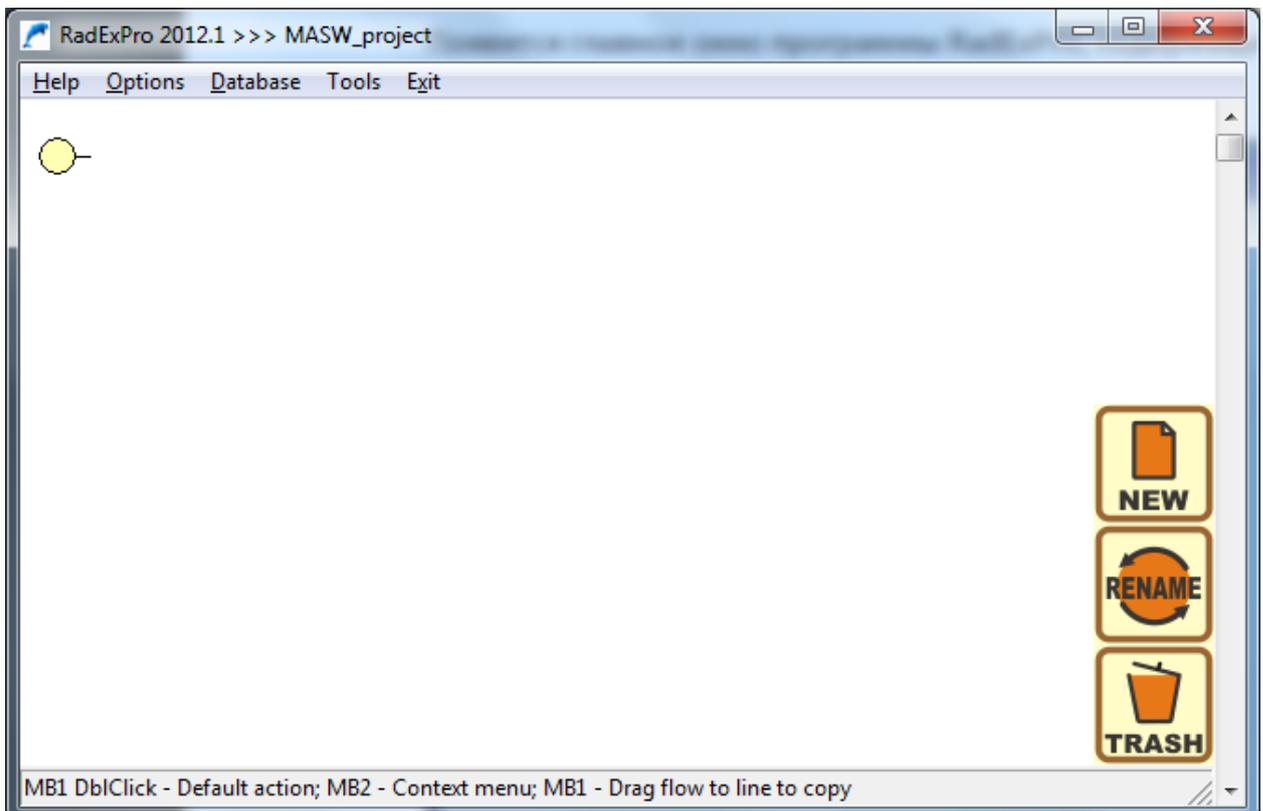
Нажмите на кнопку New Project и выберите родительский каталог на диске, в котором будет создан подкаталог с проектом. После этого, в появившемся окне, введите имя проекта:



Убедитесь в том, что опция Create subfolder выбрана и нажмите OK. В выбранном каталоге появится подкаталог с именем проекта. Также проект появится в списке доступных (зарегистрированных) проектов. Выберите его и нажмите OK.

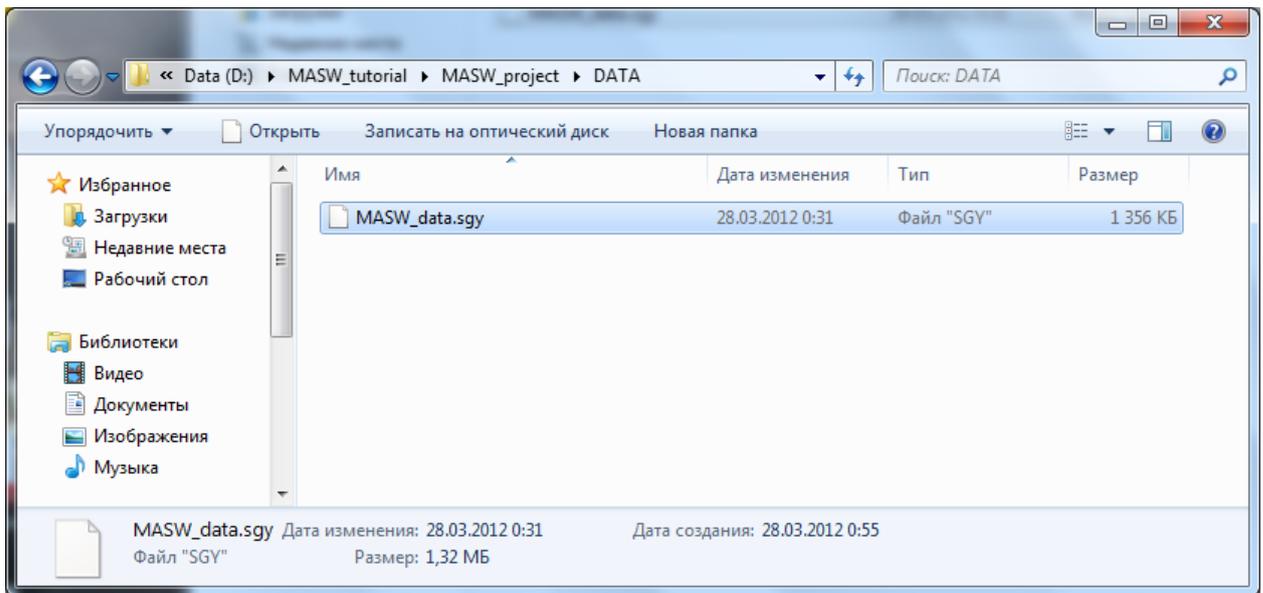


Появится главное окно программы RadExPro, содержащее дерево проекта. Пока это дерево пусто.



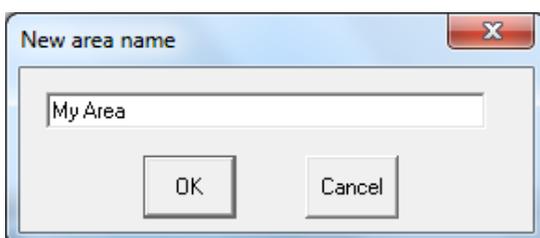
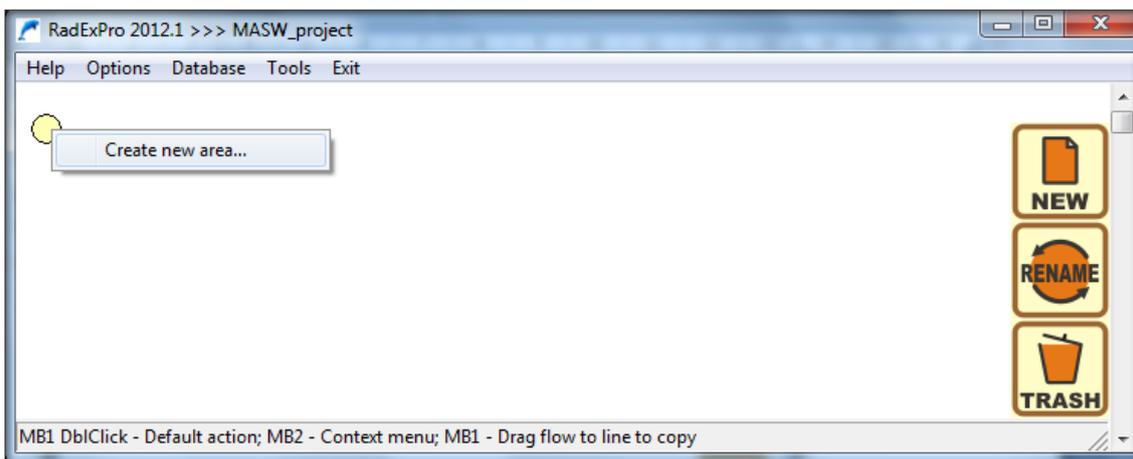
Загрузка исходных данных в проект

Используя проводник Windows, перейдите в папку проекта, создайте в ней подкаталог Data и скопируйте в него исходные данные:

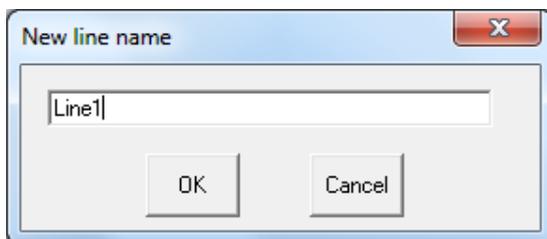
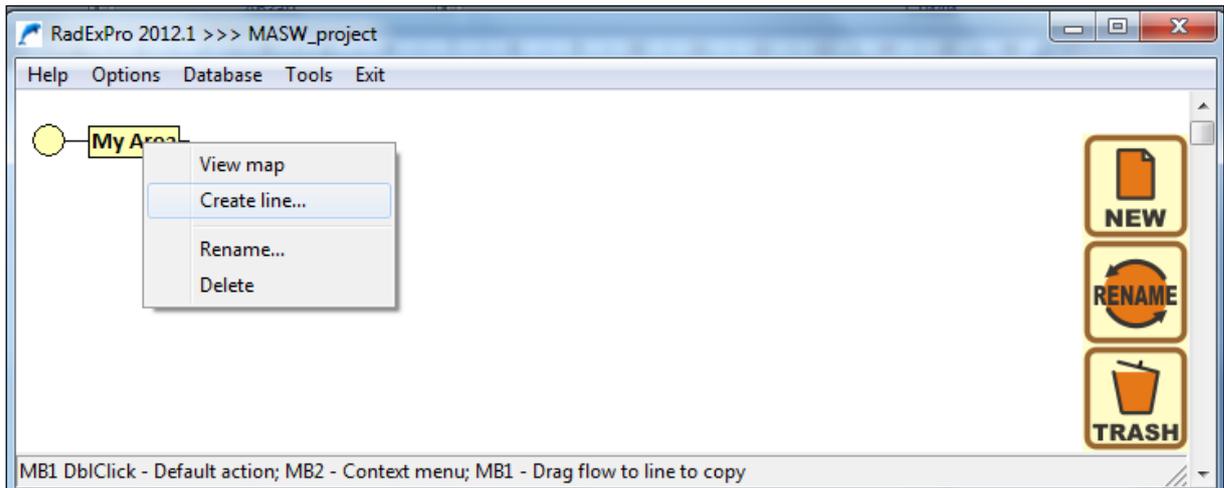


Хранение данных внутри каталога проекта позволяет пакету использовать относительные пути до файлов с данными вместо абсолютных, что облегчает перенос проектов с компьютера на компьютер.

Вернитесь к главному окну программы RadExPro. База данных RadExPro имеет 3 структурных уровня. Верхний уровень отвечает площади, на которой проводились работы, средний – профилю, нижний – потоку обработки. Кликните правой кнопкой мыши на желтом кружке, выберите опцию Create new area и введите название площади, на которой проводились работы.



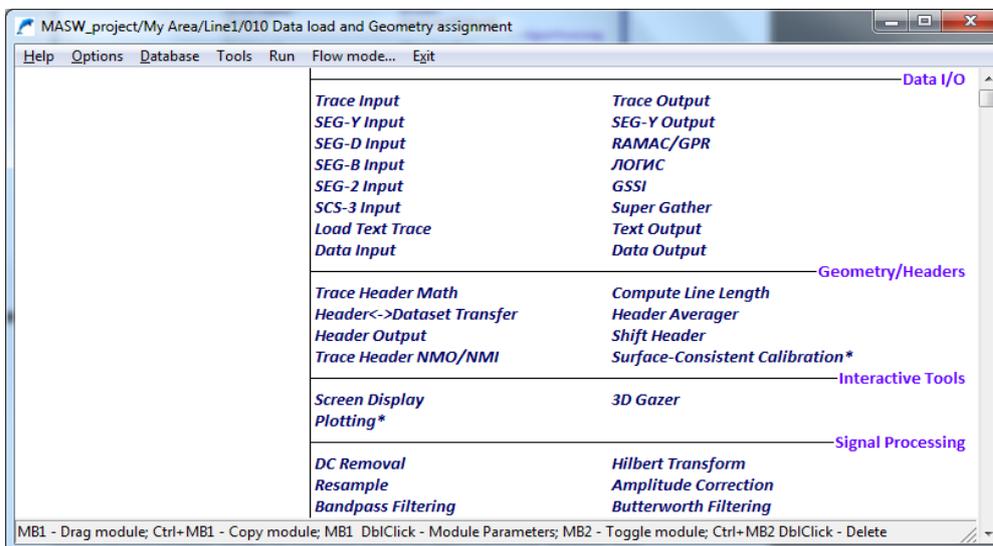
Аналогично, кликнув правой кнопкой мыши на желтом прямоугольнике с названием площади, выберите пункт Create line и создайте новый профиль.



База данных позволяет в рамках одного проекта хранить несколько площадей, в каждой из площадей – несколько профилей, каждый профиль обрабатывается в нескольких потоках. По аналогии с созданием площади и профиля, создадим поток обработки *010 – Data Load and Geometry Assignment*.

В начале названия каждого потока рекомендуется использовать его номер. Процесс обработки сейсмических данных происходит в несколько этапов, выполняемых последовательно. В силу того что программа RadExPro располагает названия структурных элементов базы данных в алфавитном порядке, разумно нумеровать потоки, чтобы они отображались в верной логической последовательности.

Перейдите в режим редактирования потоков, дважды кликнув левой кнопкой мыши по названию потока. Откроется окно редактора потока. В левой части окна располагается сам поток (пока он пуст), справа – библиотека доступных процедур (модулей), разделенная на смысловые группы.



Создадим поток, состоящий из модулей Seg-y Input, Near-Surface Geometry Input и Trace Output, в результате выполнения которого будут выполнены следующие процедуры (соответственно их расположению в потоке):

1. чтение данных из исходного Seg-y файла;
2. присвоение геометрии этим данным;
3. запись в базу данных проекта в виде объекта базы – «набора данных»

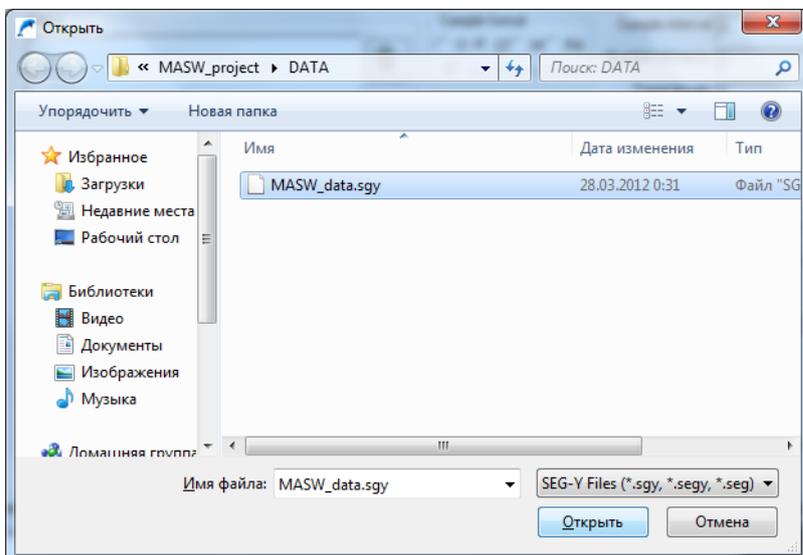
Модули добавляются в поток по одному. Для того чтобы добавить модуль в поток - просто перетащите его из библиотеки справа в область потока слева. При этом откроется диалог настройки параметров модуля. (В дальнейшем, тот же диалог параметров модуля в потоке можно вызвать двойным щелчком мыши на имени модуля). Модули, уже находящиеся в потоке, можно перемещать вверх-вниз относительно друг друга, перетаскивая их мышью.

Рассмотрим указанные выше процедуры подробно:

1. Чтение данных из Seg-y файла:

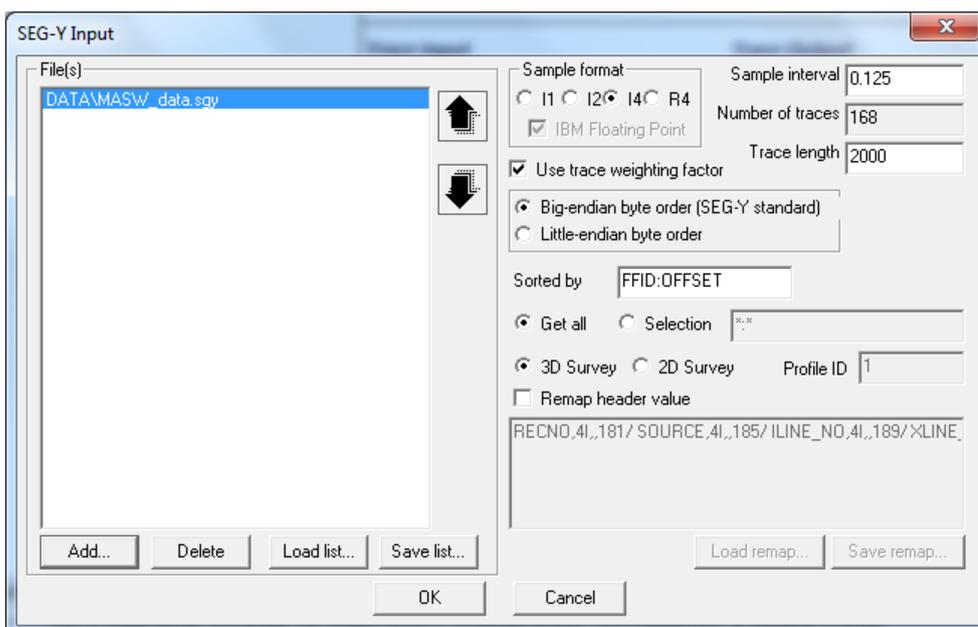
Из группы Data I/O добавим в поток модуль SEG-Y Input.

Добавим полученные данные, нажав кнопку Add и указав местоположение файла (он был скопирован в папку DATA текущего проекта). Для этого необходимо выбрать файл в папке и нажать «Открыть».



Список добавленных файлов отображается в левой части модуля. В правой части задаются параметры и формат записи файлов (они определяются автоматически, однако всегда могут быть изменены в случае неправильного определения программой). В нашем случае автоматически определенные параметры верны.

По нажатию на кнопку ОК окно с параметрами модуля закрывается, и модуль появляется в потоке.



Примечание 1

Указанный Seg-y файл содержит 7 пунктов возбуждения. Если в ваших данных каждый ПВ соответствует отдельному файлу, записанному в одном из следующих форматов: Seg-y, Seg-2, Seg-d, загрузите все файлы, используя соответствующие модули ввода данных (Seg-y Input, Seg-2 Input, Seg-d Input) одновременно. Это позволит вам выписать все ПВ в один набор данных, что значительно упростит работу с программой в дальнейшем.

2. Присвоение геометрии

Присвоение геометрии к сейсмическим данным заключается в том, что для каждой трассы определяется ряд значений, которые, затем, сохраняются в указанные поля заголовков набора данных в базе данных проекта.

В случае многоканального анализа поверхностных волн для корректной работы модуля должны быть определены следующие заголовки:

- 1) Номер пункта возбуждения (FFID)
- 2) Номер канала (CHAN)
- 3) Координата источника (SOU_X)
- 4) Координата приемника (REC_X)
- 5) Расстояние между источником и приемником (OFFSET)

На практике может встречаться абсолютно любое сочетание заполненных заголовков трасс. Например, данные могут быть переданы в обработку вообще с пустыми заголовками. В этом случае их придется формировать с использованием инструментов, предлагаемых пакетом обработки.

Примечание 2

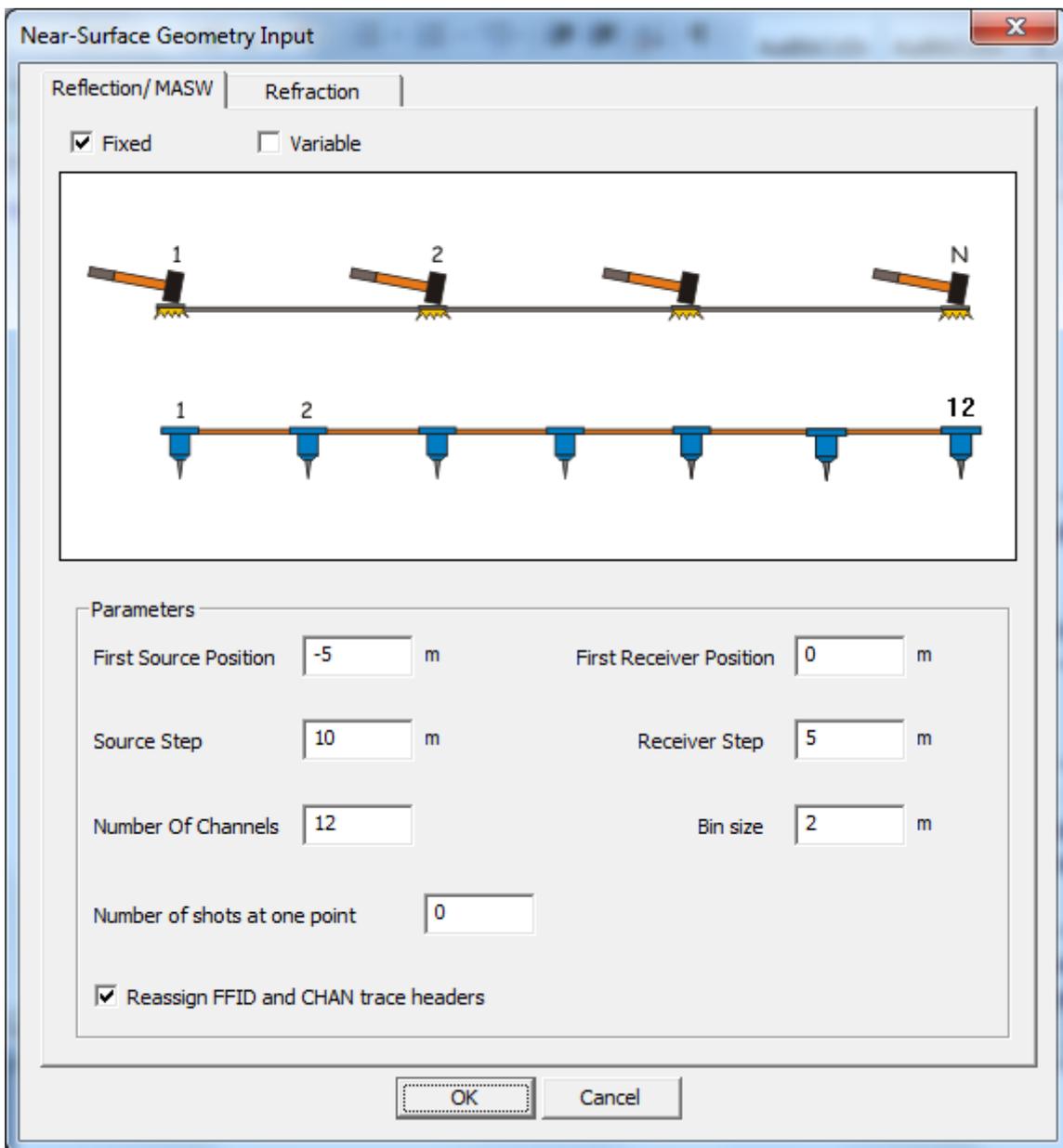
В данном руководстве процедура присвоения геометрии будет осуществляться с помощью модуля Near-Surface Geometry Input (полное описание модуля приведено в Руководстве Пользователя). Однако необходимо отметить, что присвоение геометрии (заполнение заголовков) может быть осуществлено также с помощью стандартного средства RadExPro - Geometry Spreadsheet.

После модуля Seg-y Input добавьте в поток модуль Near-Surface Geometry Input. Данный модуль позволяет присвоить геометрию загруженным файлам интерактивно. В результате работы модуля будут рассчитаны следующие заголовки файлов:

- 1) Координата источника (SOU_X)
- 2) Координата приемника (REC_X)
- 3) Расстояние между источником и приемником (OFFSET)

Примечание: заголовки FFID, CHAN, которые также необходимы для расчета дисперсионного изображения, в исходном файле заполнены верно. В случае, если данные заголовки пустые следует воспользоваться функцией Reassign FFID and CHAN trace headers.

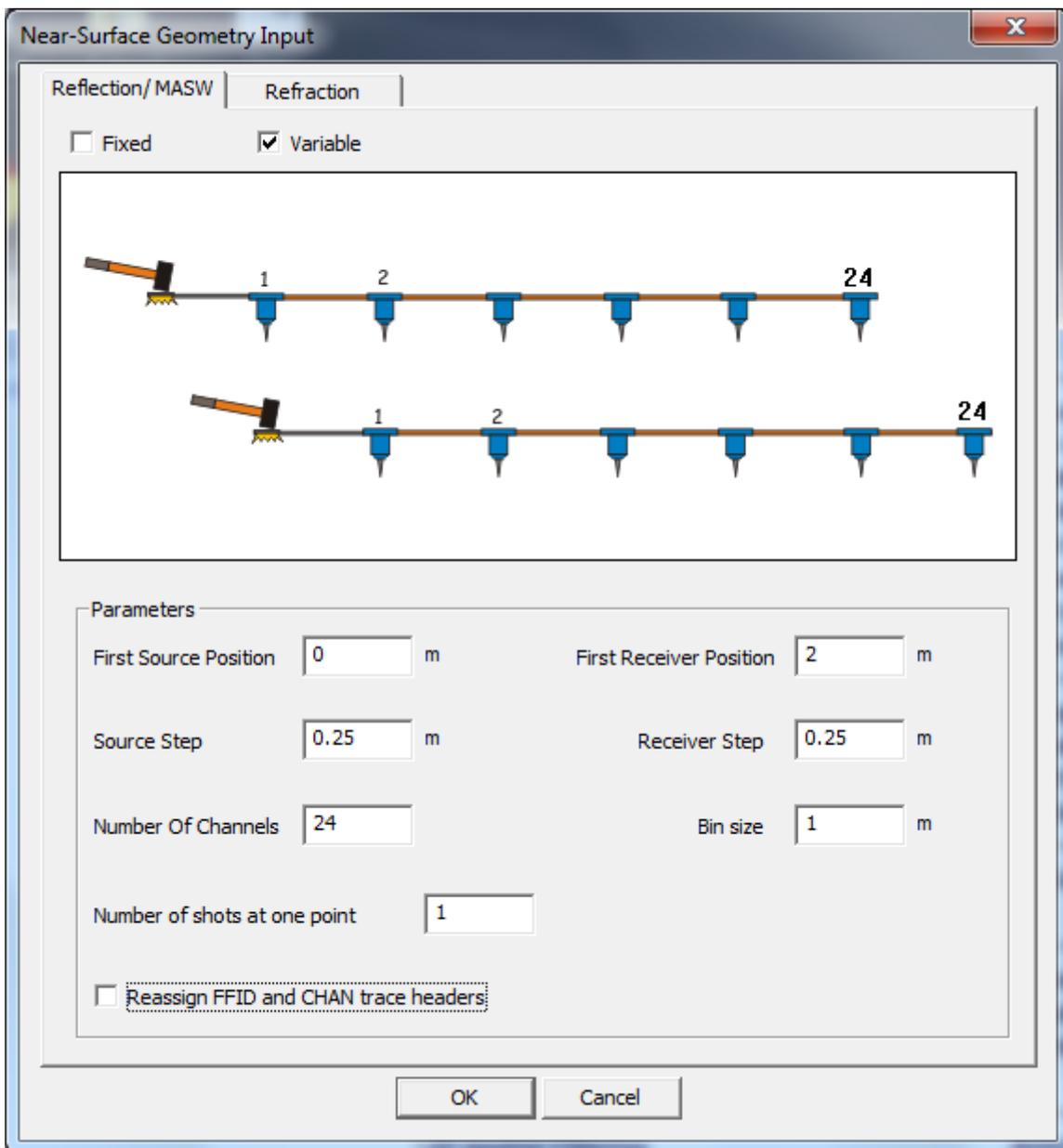
По умолчанию при добавлении модуля в поток открывается следующее окно:



Для присвоения геометрии исходным файлам необходимо заполнить соответствующие поля модуля согласно параметрам проведенной съёмки: линия приёма – 24 канала, расстояние между каналами – 0.25 м (вертикальные сейсмоприемники). Расстояние источник – первый приемник – 2 м. Вся расстановка двигалась через 0.25 м (фланговая система наблюдений).

Примечание 3: общие сведения о методике проведения полевых работ по методу многоканального анализа поверхностных волн даны в приложении 1.

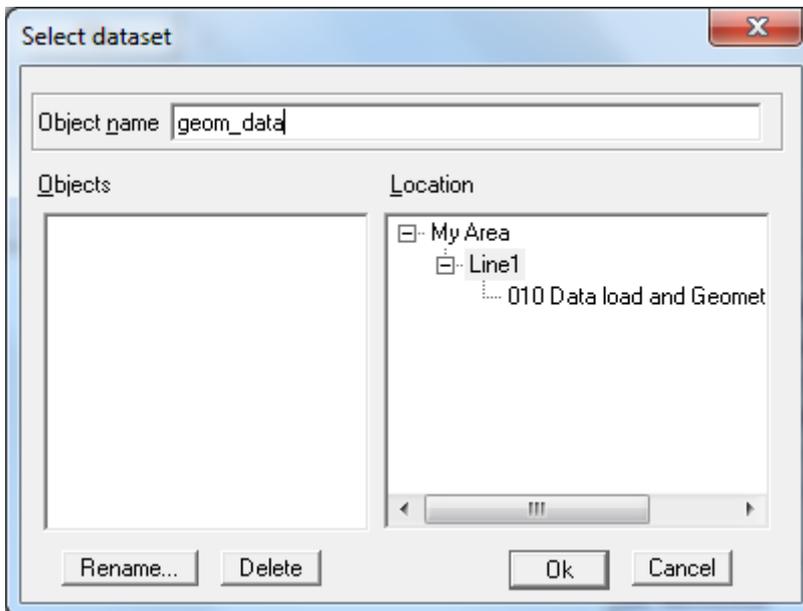
Установите вкладку Variable и заполните поля как показано на картинке (согласно указанным выше параметрам):



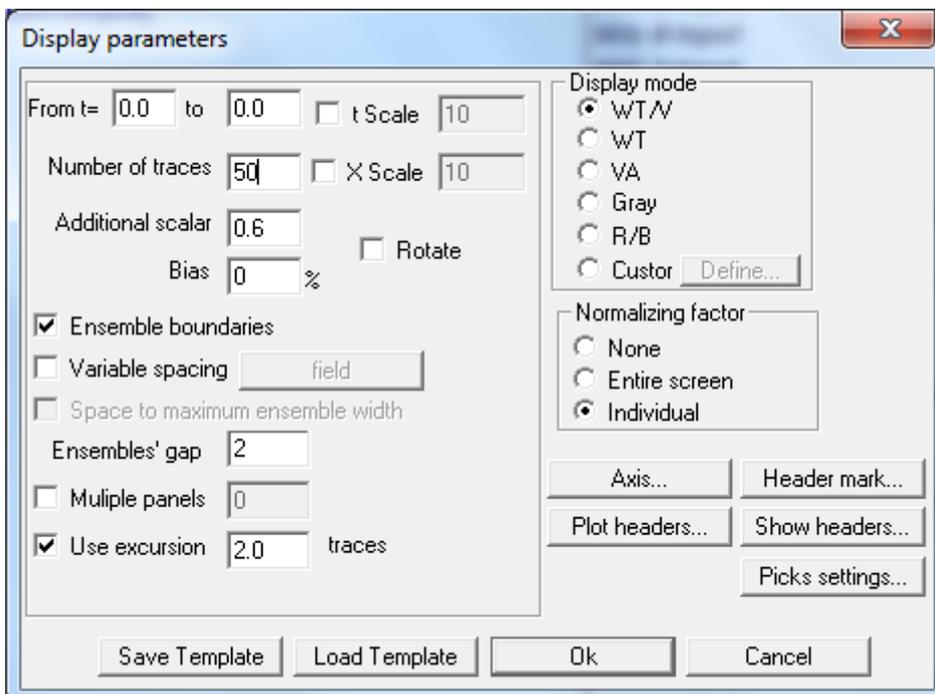
Нажмите ОК, модуль появится в списке потока.

3. Запись в базу данных проекта

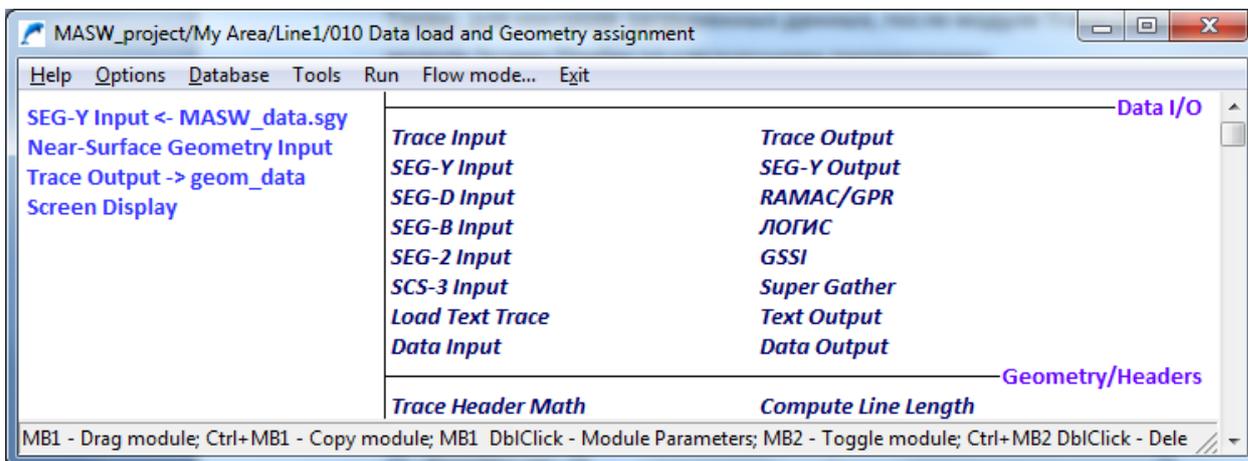
После модуля Near-Surface Geometry Input в поток добавим модуль Trace Output, который должен сохранить данные с присвоенной геометрией в базу данных. Объект, который будет содержать эти данные, назовём geom_data и разместим на втором уровне базы данных в профиль Line1:



Также, для контроля загруженных данных, после модуля Trace Output добавьте в поток модуль Screen Display со следующими параметрами:

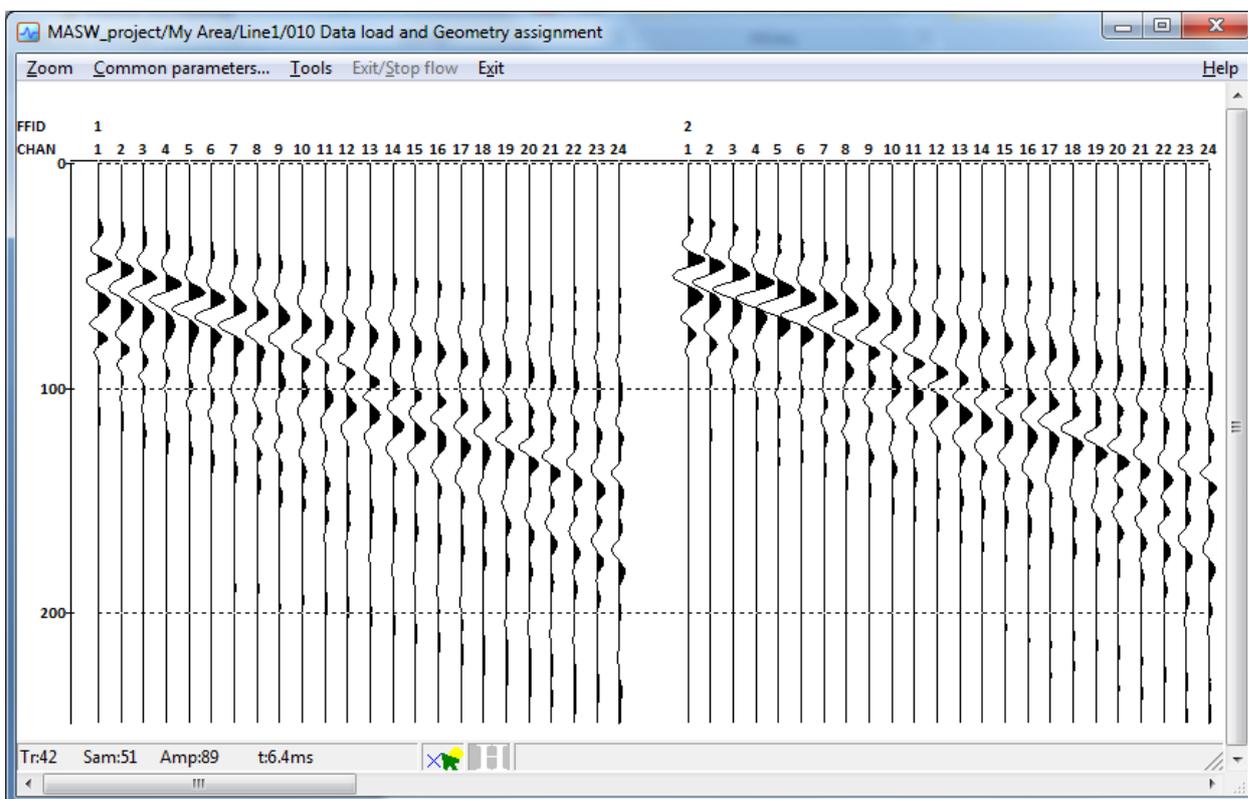


Полученный поток должен выглядеть следующим образом:



Запустите поток на выполнение, нажав Run.

В результате должно открыться окно Screen Display, отображающее вводимые данные, а сами данные будут прочитаны из файла на диске, им будет присвоена геометрия и они будут записаны в базу данных. Окно Screen Display, которое должно появиться на экране, приведено ниже.

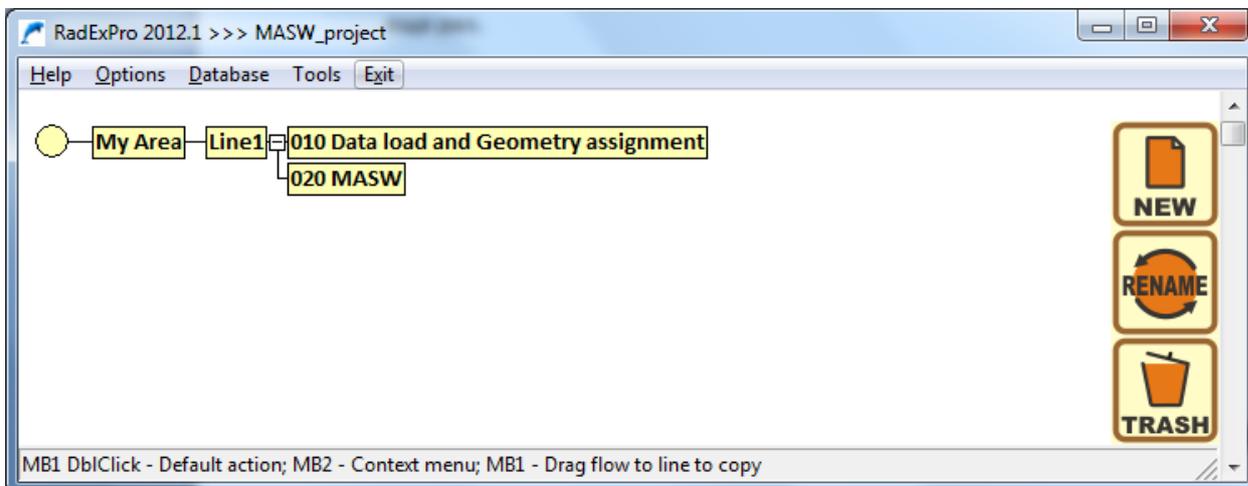


Для выхода из окна Screen Display нажмите Exit. Далее выйдите из потока 010, нажав Exit еще раз.

Работа с модулем MASW

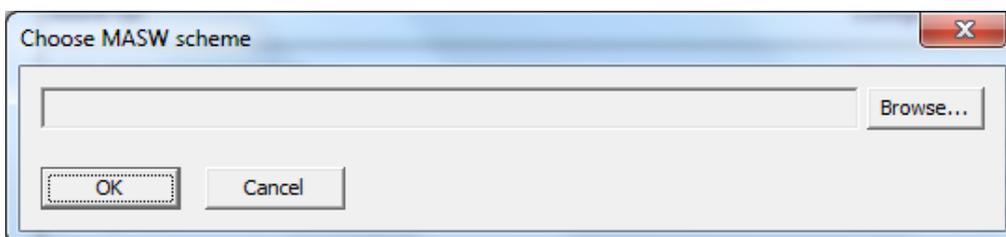
Задание схемы обработки

Создайте новый поток обработки “020 – MASW”:

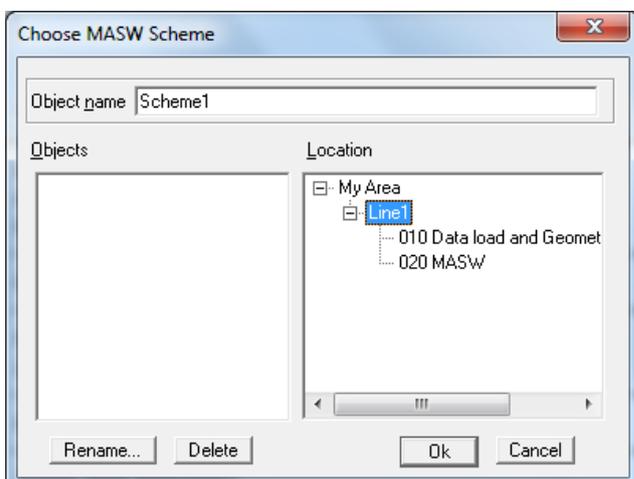


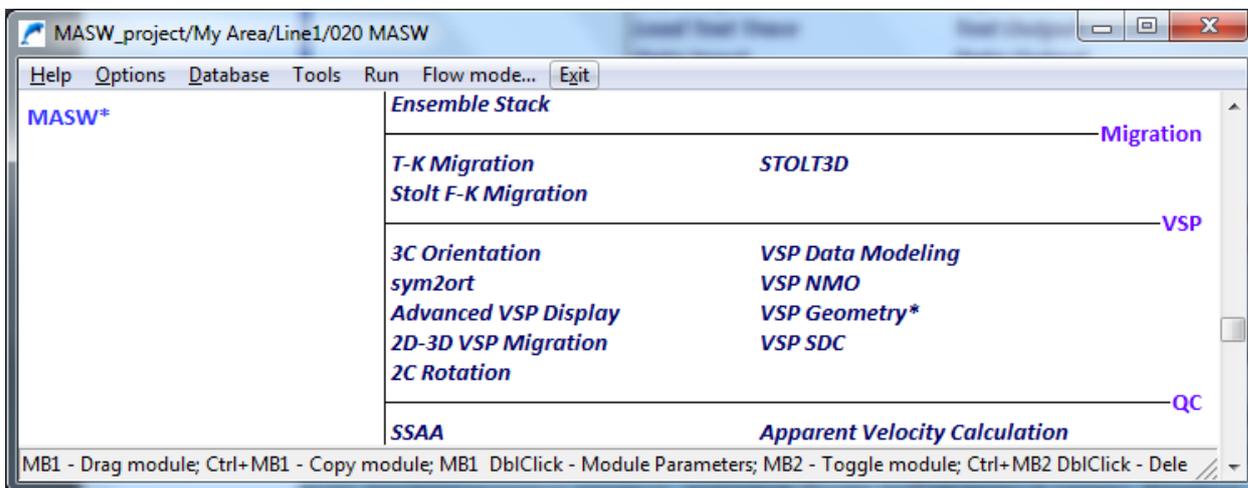
Зайдите в поток и добавьте модуль MASW, находящийся в группе Surface Wave Analysis. Обработка данных производится в рамках той или иной схемы обработки. Схема представляет собой совокупность дисперсионных изображений, соответствующих им кривых, результирующей модели, а также параметров расчета и визуализации изображений и модели. Каждая схема хранится в отдельной директории “MASW” внутри проекта.

При добавлении модуля в поток появится диалог выбора схемы – создайте новую схему, нажав кнопку “Browse...”



Назовем схему Scheme1 и сохраним ее на уровне текущей линии. По нажатию на кнопку ОК модуль появится в списке.

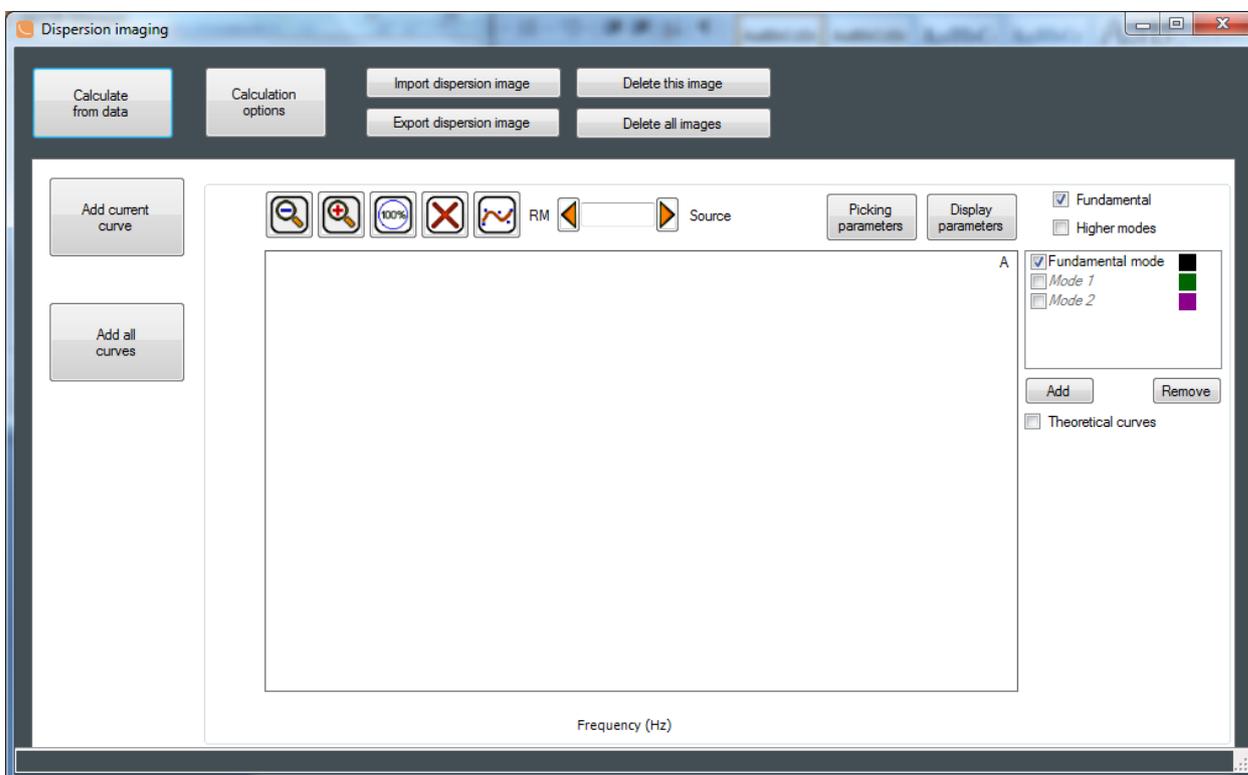




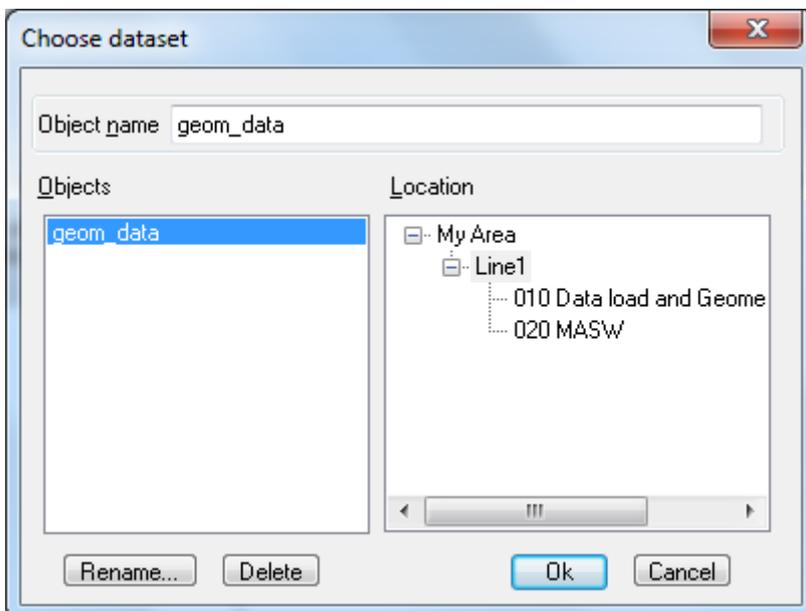
Запустите модуль, нажав кнопку Run. В результате появится главное окно управления проектом – “MASW Manager”. В левой части данного окна отображается список всех дисперсионных кривых, которые были добавлены в схему. Кривые сортируются по срединной точке приемной расстановки. Также справа отображается координата источника (заголовок SOU_X), соответствующая координате средней точке расстановки. Пока ни одного изображения не было обработано и добавлено, окно управления проектом “MASW Manager” будет пустым.

Расчет дисперсионных изображений

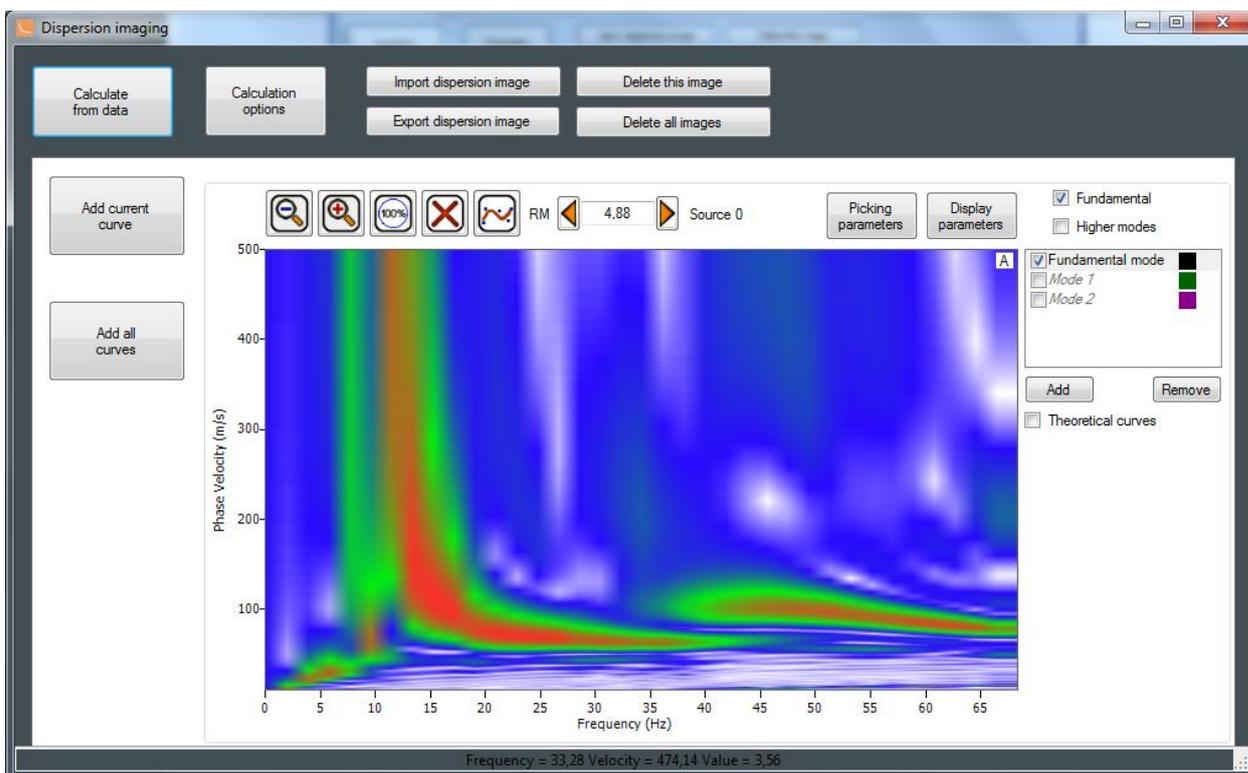
Нажмите кнопку Dispersion Imaging - появится окно расчета дисперсионных изображений и работы с ними:



Для расчета дисперсионного изображения нажмите Calculate from data, укажите путь в базе данных к сохраненному ранее набору данных geom_data и нажмите OK.



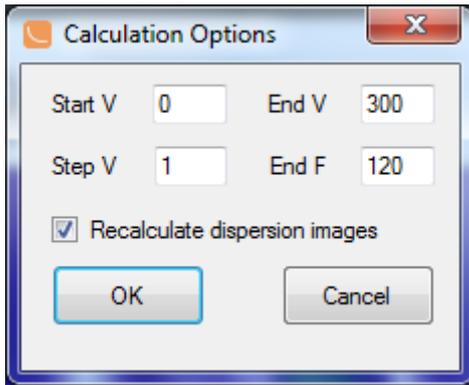
Подождите, пока расчет дисперсионных изображений завершится (исчезнет табличка «Calculating dispersion images»). По завершению на экране появится дисперсионное изображение для первого ПВ в наборе данных:



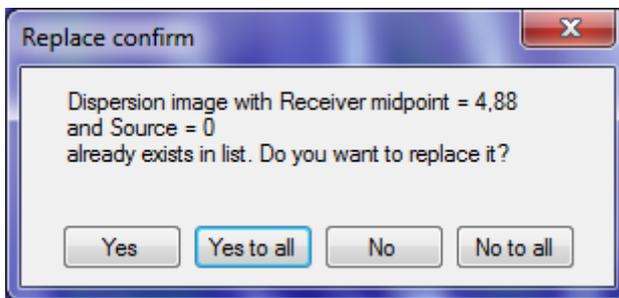
Дисперсионные изображения рассчитываются автоматически для всех ПВ в текущем наборе данных (в нашем случае будет рассчитано 7 дисперсионных изображений).

По умолчанию изображение рассчитывается в диапазоне фазовых скоростей от 0 до 500 мс с шагом 1 мс и диапазоне частот от 0 до 70 Гц. Если изображение превосходит пределы по частоте или скорости, можно изменить параметры расчета, нажав кнопку “Calculation options” и повторить процесс, начиная с выбора набора данных. В нашем примере указанные параметры расчета недостаточно информативны, первая высшая мода не

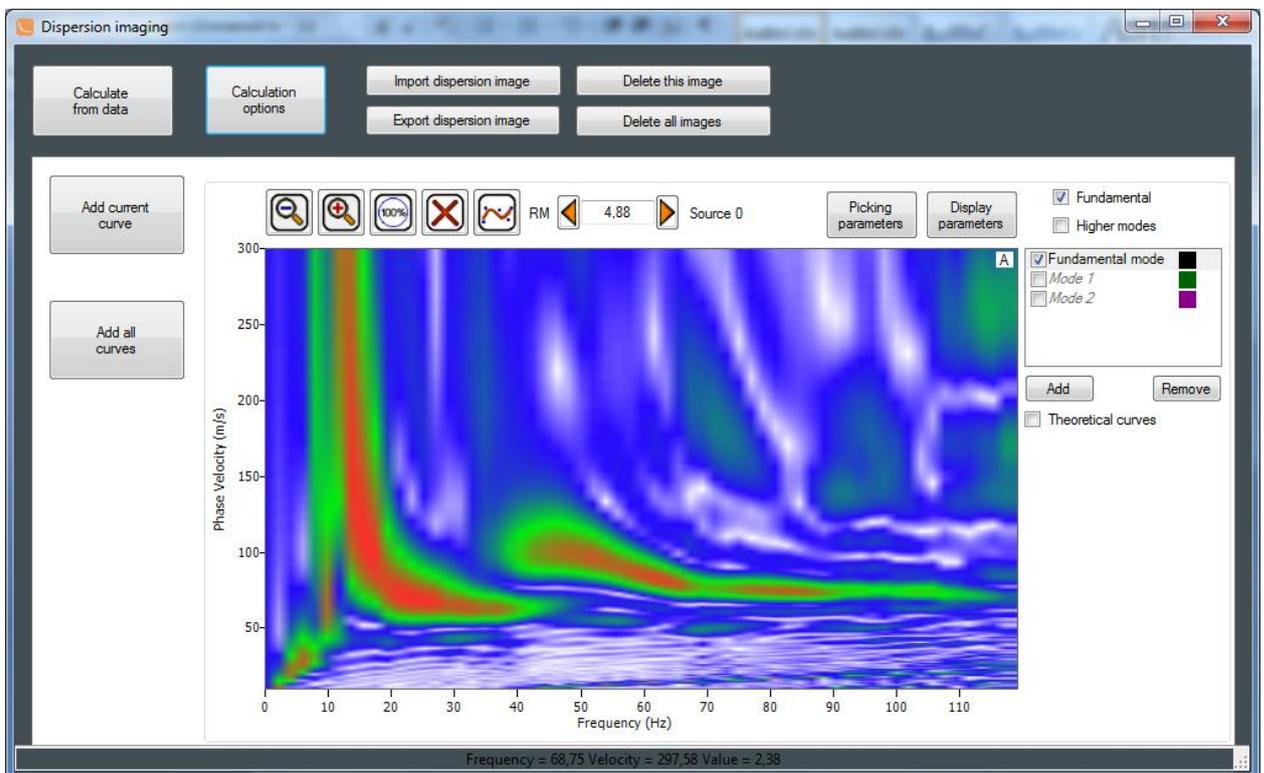
входит в указанный частотный диапазон. Изменим параметры во вкладке “Calculation options” на указанные:



Опция «Recalculate dispersion images» позволяет рассчитать дисперсионные изображения сразу по нажатию на кнопку ОК. После того, как новые изображения будут рассчитаны, на экране появится сообщение о замене старого дисперсионного изображения для указанного ПВ. Заменяем все изображения в наборе данных, нажав **Yes to all**.



Результат показан на экране:



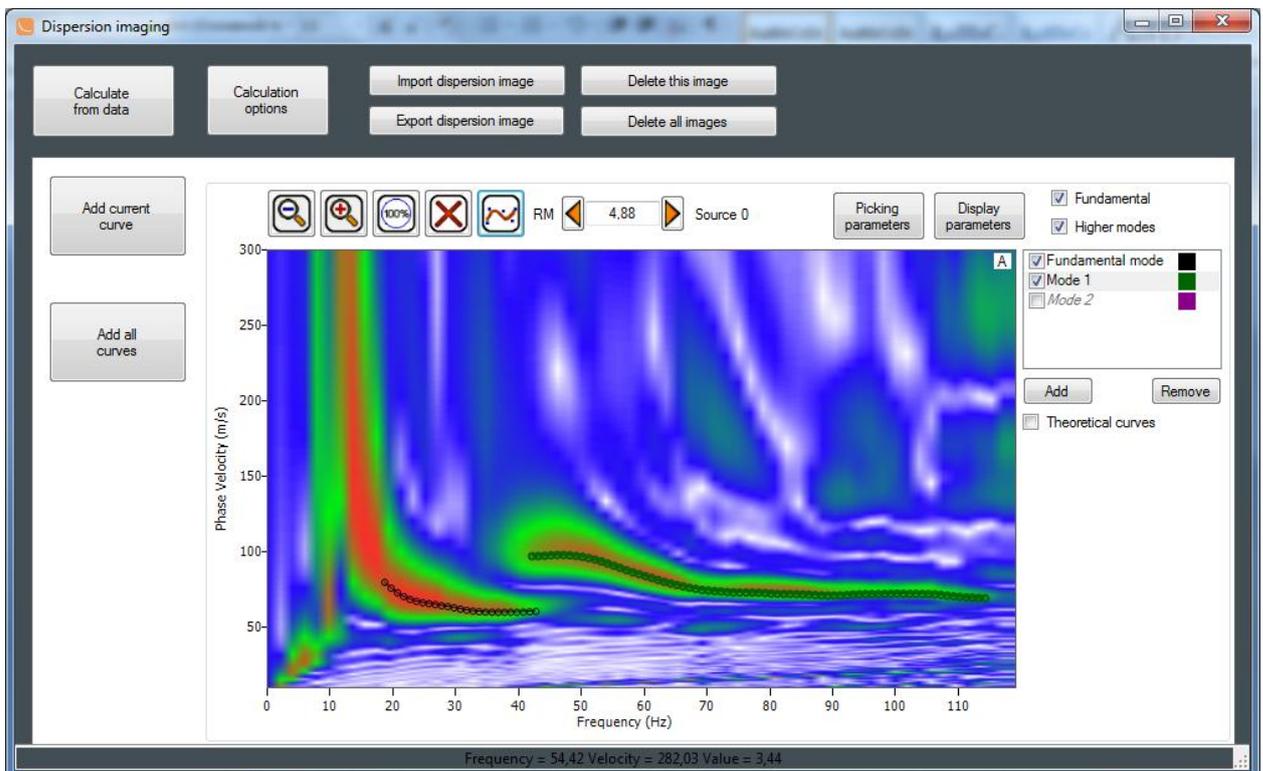
Следующим шагом необходимо «извлечь» дисперсионную кривую путём пикировки изображения по максимуму амплитуд. В данном примере мы рассмотрим процесс получения разреза поперечных скоростей с использованием не только фундаментальной, но и первой высшей моды, которая отчетливо видна в нашем случае.

По умолчанию активирован режим автоматической пикировки фундаментальной моды - точки автоматически расставляются между первой и последней по максимуму амплитуд в указанном окне с заданным шагом, параметры задаются опцией Picking parameters.

Щелкните один раз левой кнопкой мыши на максимуме в левой части дисперсионного изображения и один раз на максимуме в правой части изображения (как показано на рисунке ниже). В результате дисперсионное изображение будет пропикировано по всем максимумам амплитуд с заданным шагом между этих двух точек. Изменить положение точки можно, зажав правую кнопку мыши на данной точке и переместив её в нужное место. Удаление точки производится двойным щелчком мыши по точке.

Сглаживание пикировки производится нажатием на кнопку сглаживания  на панели инструментов. После того, как фундаментальная мода пропикирована, включите пикировку 1ой высшей моды, поставив галку напротив Mode1 и выбрав ее в правой части окна. Пикировка производится аналогичным образом.

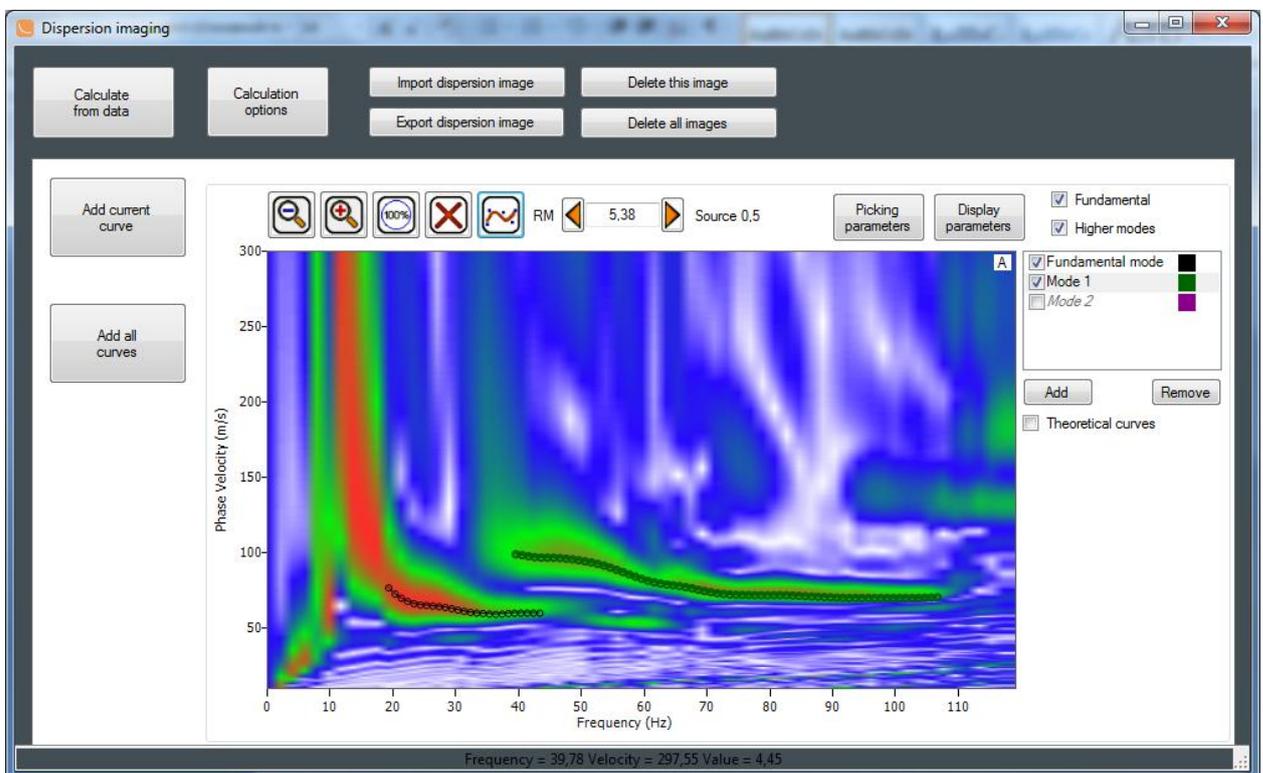
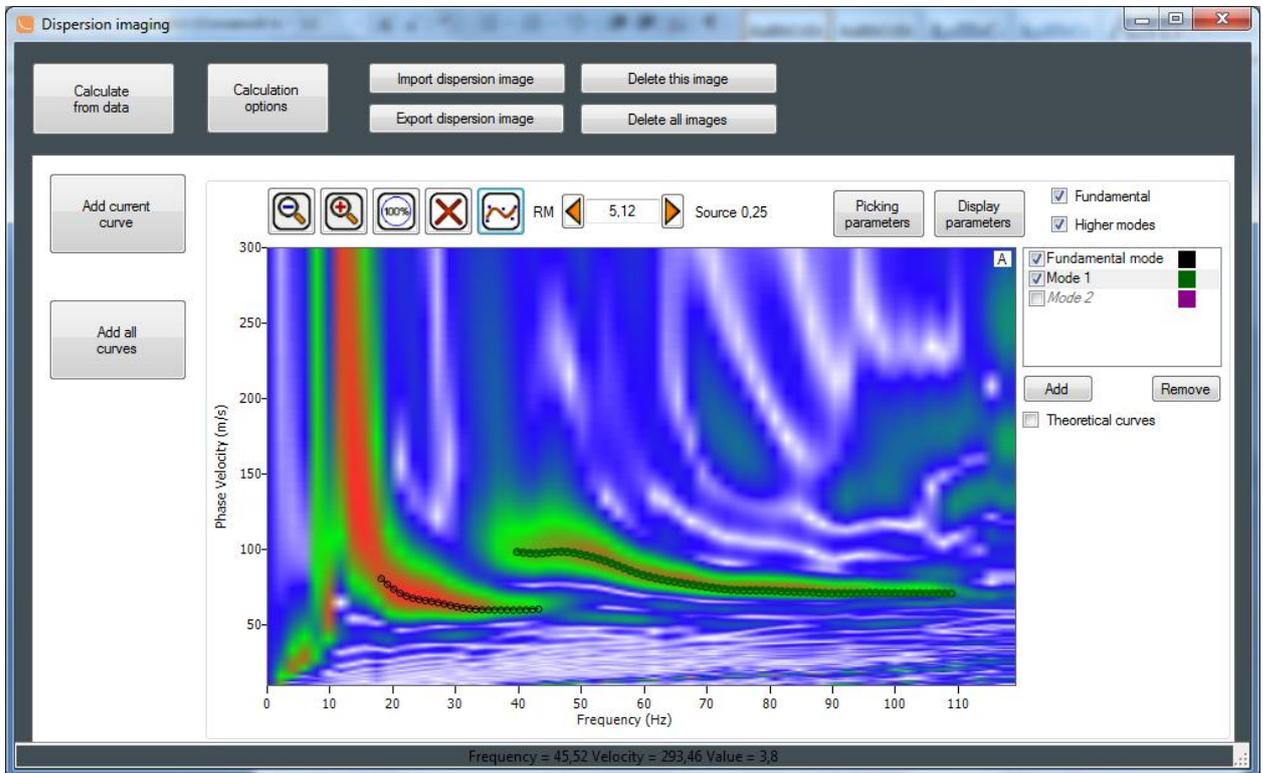
Добейтесь пикировки, схожей с картинкой:

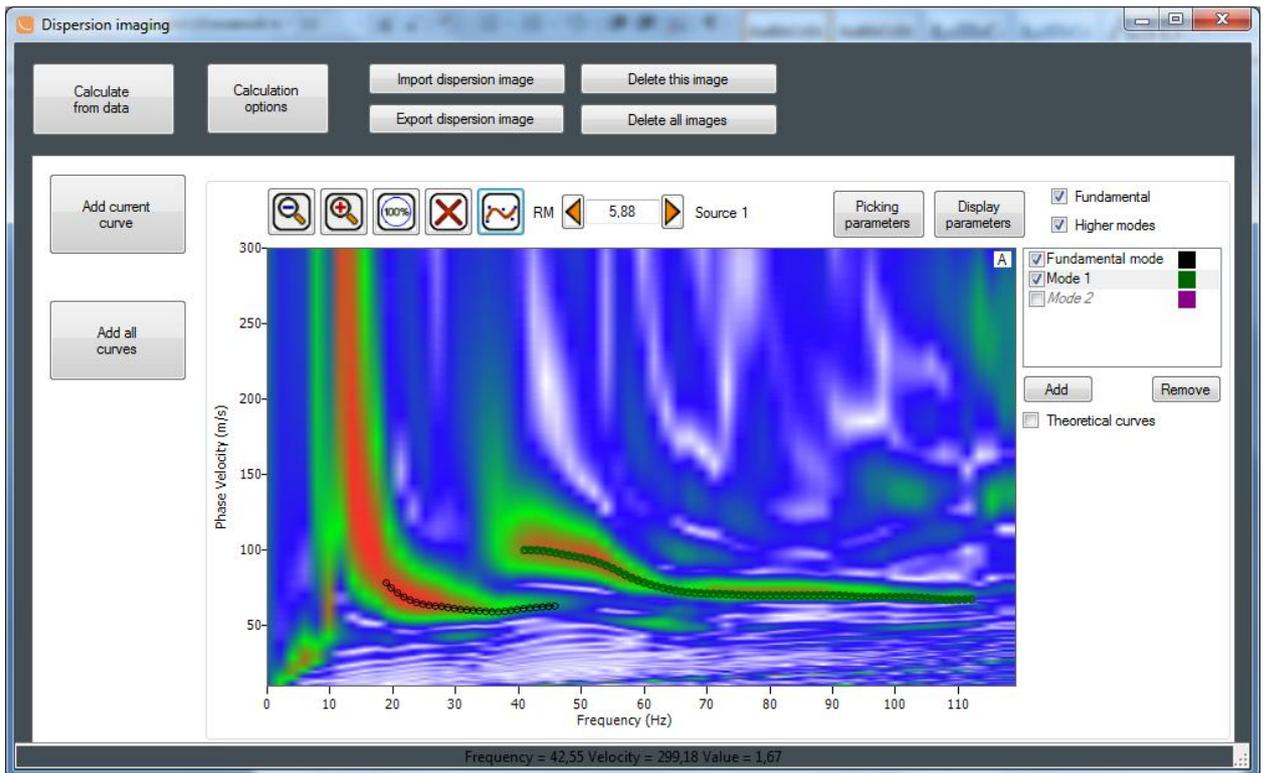
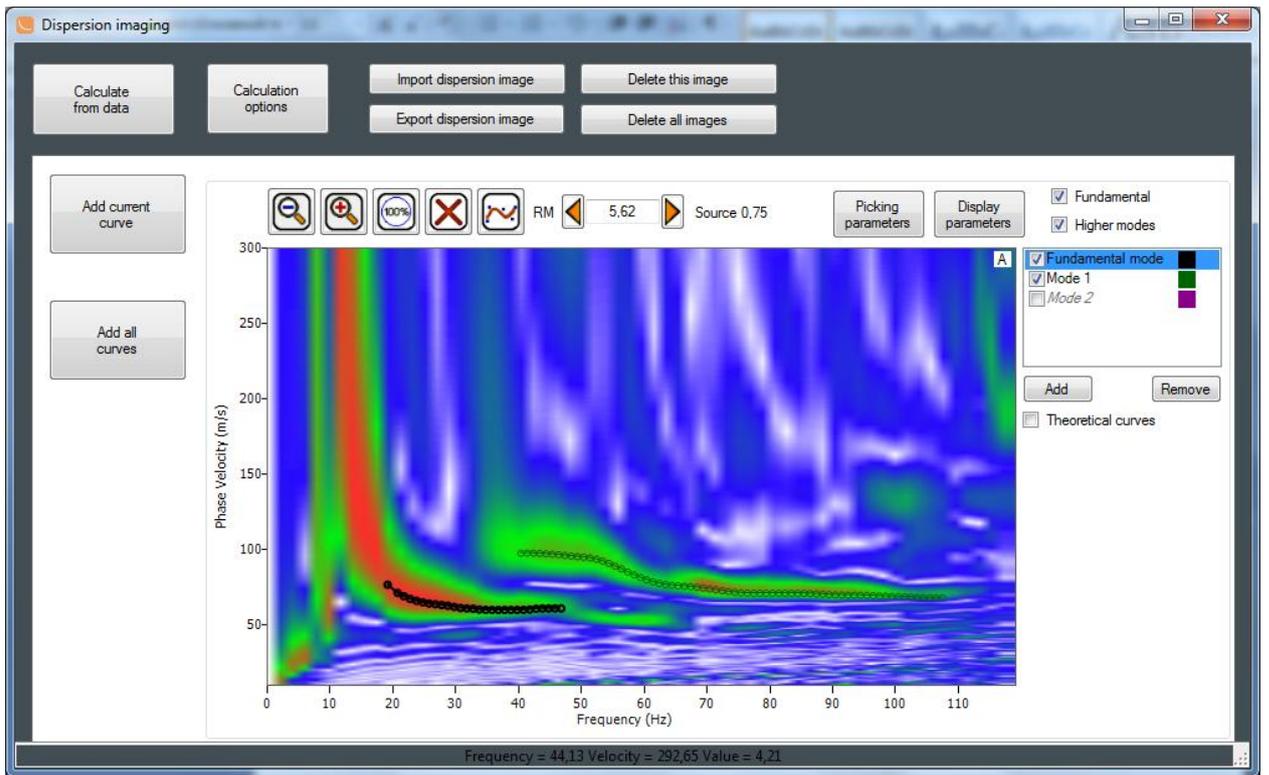


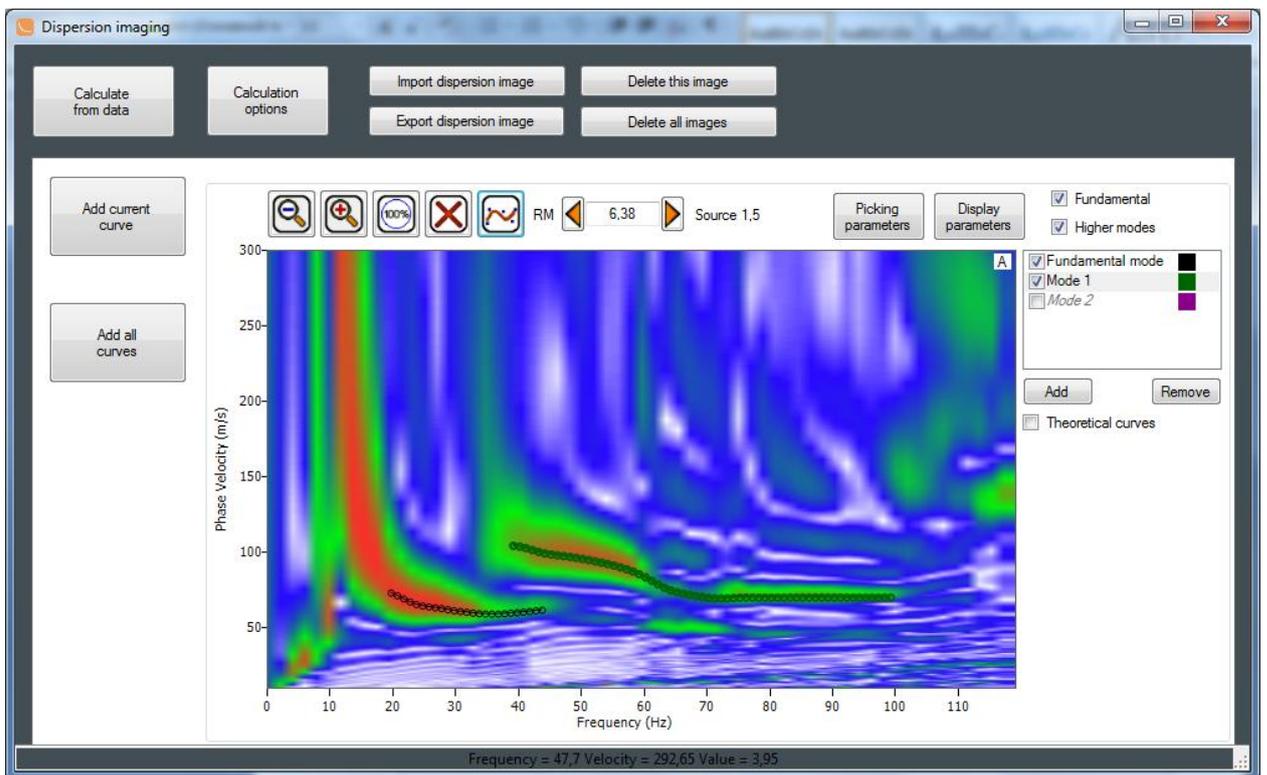
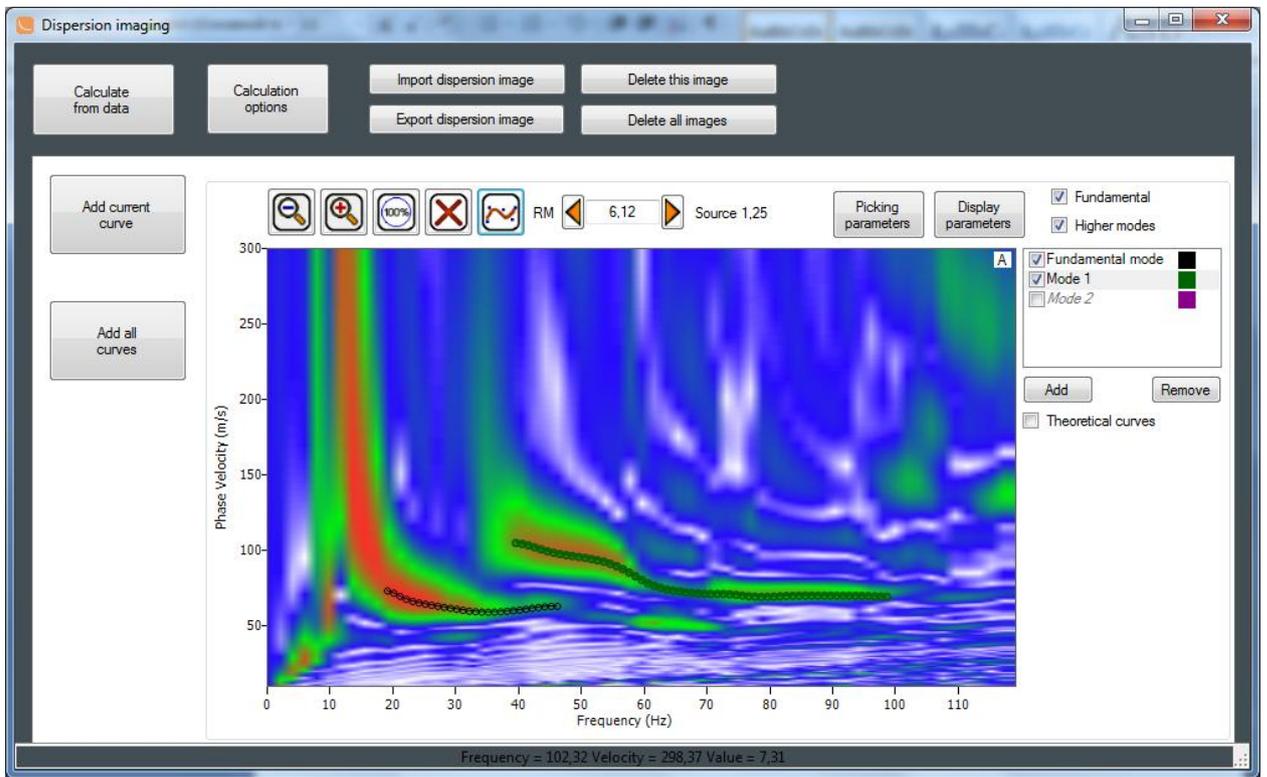
! Выделение как фундаментальной, так и высших мод на дисперсионном изображении не всегда является простой и однозначной процедурой. Выделение фундаментальной моды может быть осложнено как преобладанием высших мод, так и достаточно широким максимумом на нижних частотах. Следует иметь в виду, что изменение пикировки в

относительно небольших пределах может вызывать значительное отклонение скоростей в результирующей модели.

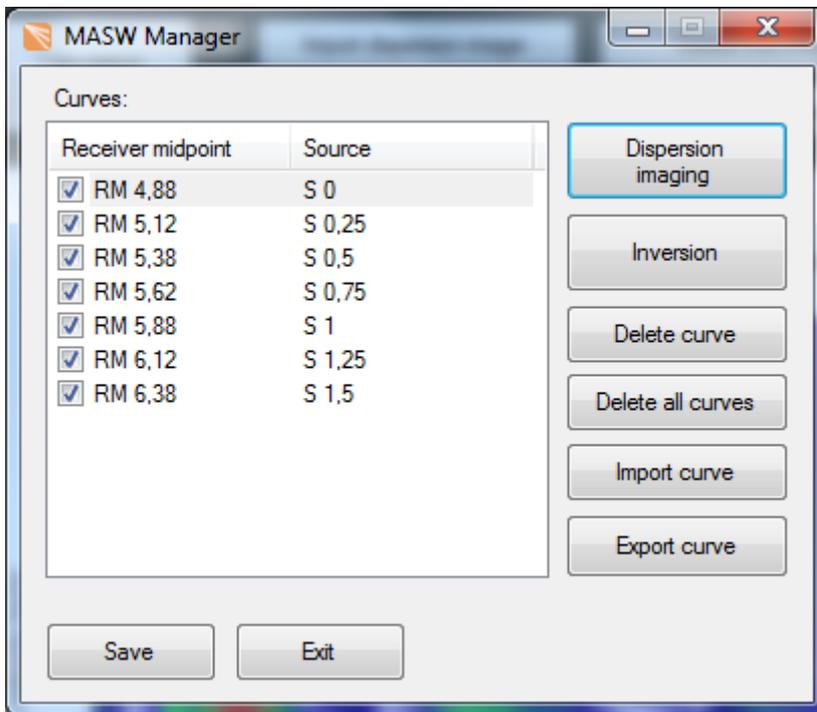
После того как пикировка одного изображения завершена – перейдите к дисперсионному изображению, относящемуся к следующему ПВ, нажав стрелку вправо  на панели инструментов. Пропикируйте остальные изображения похожим образом:





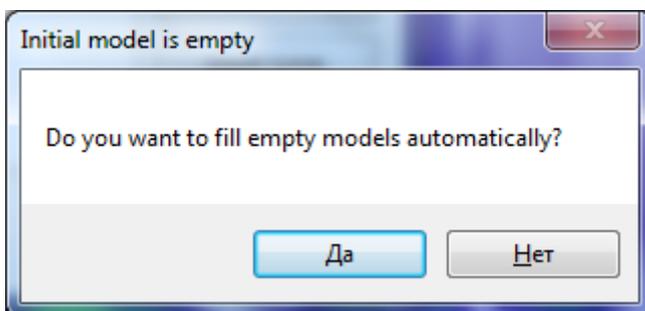


После того, как все кривые пропикированы, необходимо добавить их в список кривых, которые будут участвовать в обработке (будут поданы на вход процедуры инверсии). Для этого нажмите **Add all curves** слева в окне расчета дисперсионных изображений. В результате кривые появятся в списке главного окна проекта:



Процедура инверсии

Перед тем как начать процесс подбора кривых, необходимо задать начальную модель среды. Нажмите кнопку Inversion - появится диалог выбора типа заполнения начальной модели.



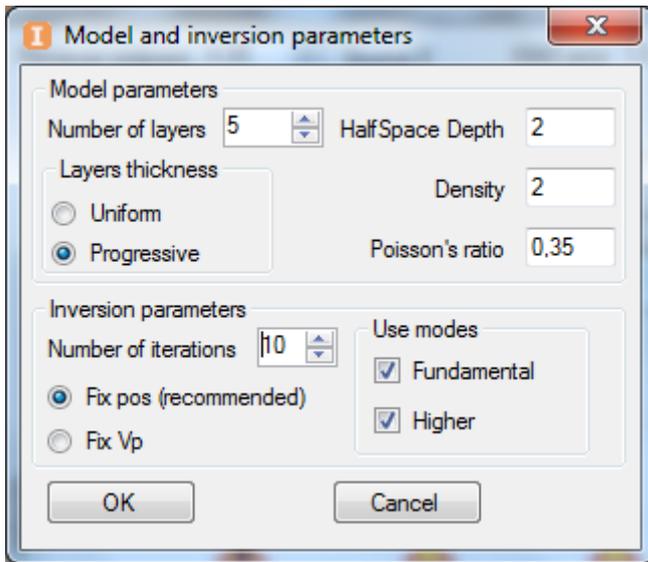
Выберем автоматическое заполнение, нажав кнопку «Да». В результате появится окно задания параметров начальной модели.

Выбор параметров начальной модели:

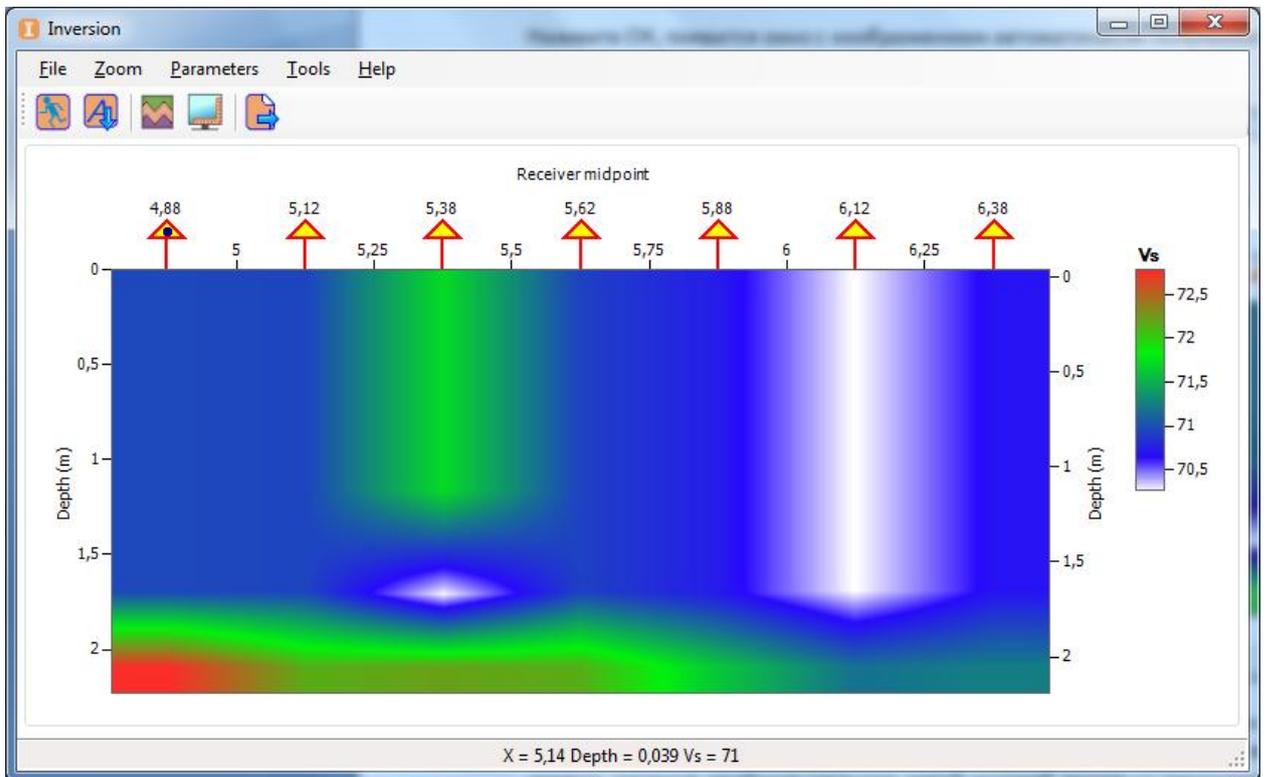
1. Глубина до полупространства. Приблизительную оценку глубины до полупространства следует выбирать исходя из одной трети - половины максимальной длины волны. При этом следует помнить, что при использовании высших мод глубина проникновения для одной и той же частоты увеличивается. Определим максимальную длину волны из дисперсионного изображения, относящегося к первому ПВ. Крайняя точка имеет частоту ~ 18.5 Гц и фазовую скорость ~ 82 м/с, что соответствует длине волны примерно равной 4.4 м.

Зададим глубину до полупространства, равной 2 м.

2. Установите остальные параметры как показано на картинке:

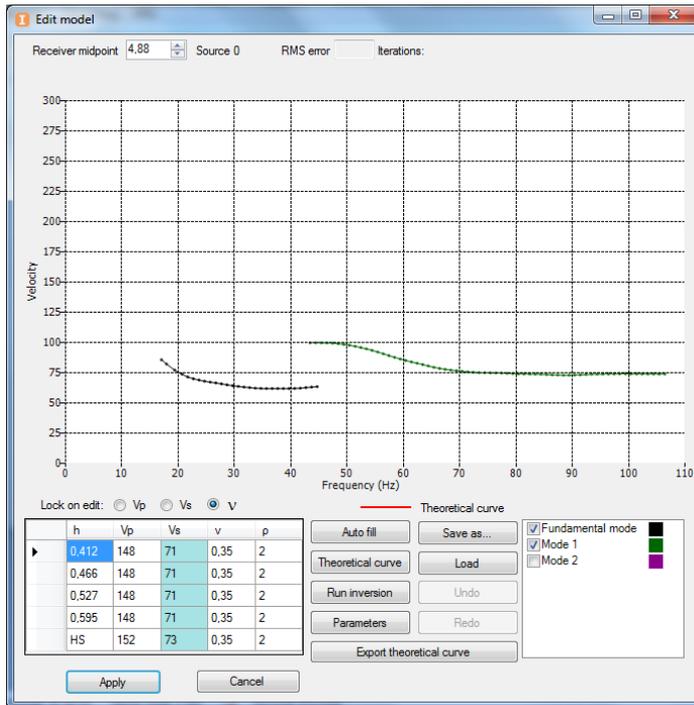


Нажмите ОК, появится окно с изображением автоматически полученной начальной модели:

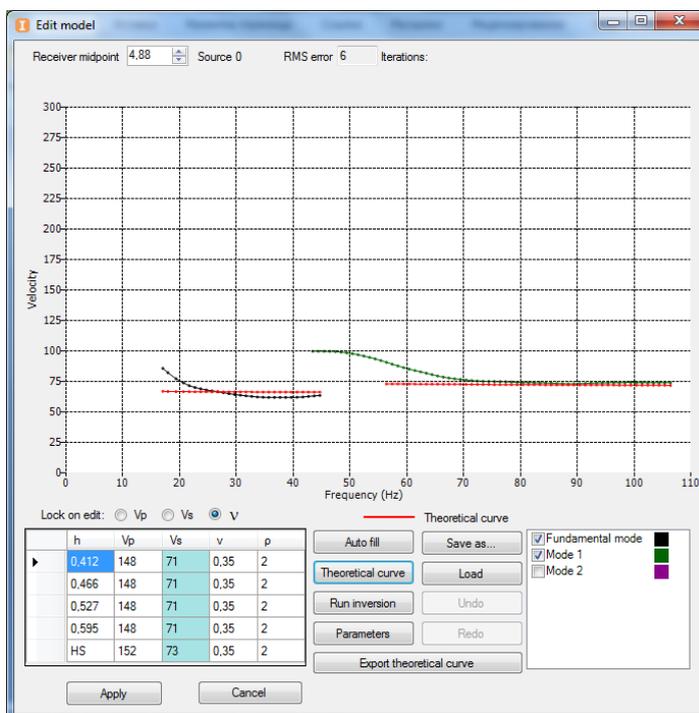


Треугольниками обозначены срединные точки расстановки, к которым привязаны кривые, а соответственно и профили поперечных скоростей. Перейдите в режим подбора кривых, щелкнув двойным щелчком левой кнопкой мыши на треугольнике первого ПП.

Появится окно подбора кривых. По умолчанию, черным цветом в нем отображается пропикированная фундаментальная кривая, зеленым – кривая 1ой высшей моды.



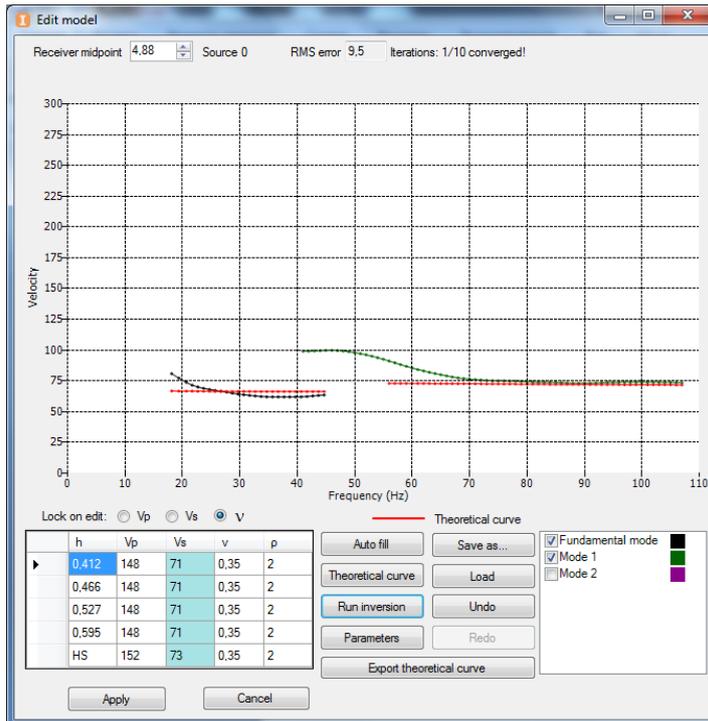
В нижней части окна отображается начальная модель среды, исходя из тех параметров, которые были заданы нами ранее. Чтобы отобразить теоретические кривые для данной модели, нажмите Theoretical Curve – они будут изображены красным цветом:



Как видно из рисунка, для данной модели среды, указанной в таблице, первой высшей моды на частотах ниже 55 Гц не существует.

Запустите процесс подбора теоретических кривых, нажав кнопку **Run Inversion**. На каждой итерации текущая модель среды и соответствующие ей кривые обновляются. Процесс

останавливается при достижении указанной среднеквадратической ошибки. Результат подбора кривых для данного ПВ выглядит следующим образом:



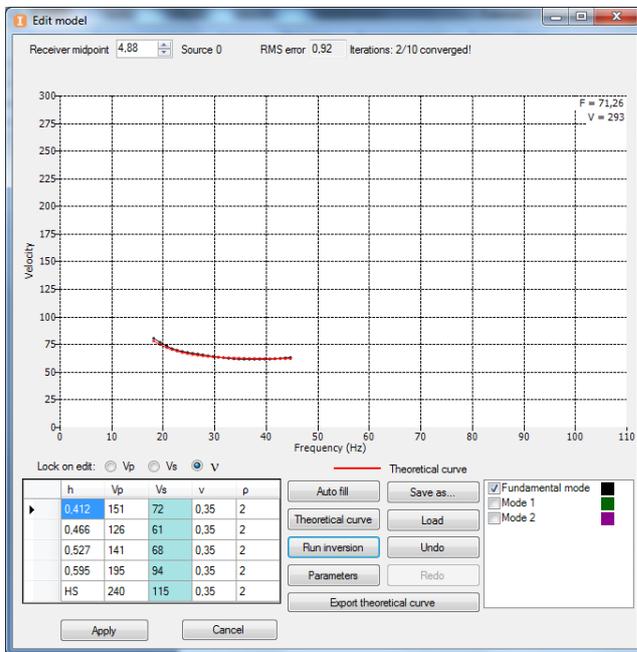
Мы видим, что подбора кривых не произошло (изменение кривых не происходит). Это связано с тем, что начальная модель была выбрана неудачно, вследствие чего инверсия «свалилась» в локальный минимум. Решением проблемы является выбор другой (более правильной) начальной модели для процедуры инверсии.

Предлагается несколько решений проблемы выбора начальной модели в данном случае:

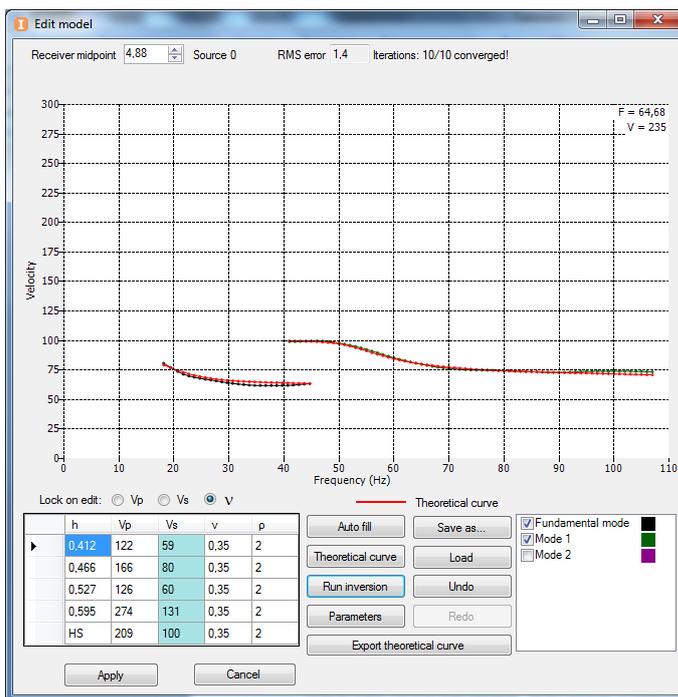
1) Отключить кривую высшей моды и сделать инверсию для фундаментальной моды. Далее использовать получившуюся модель как начальную при инверсии обеих мод. Поскольку инверсия с использованием высших мод позволяет уточнить модель, которую можно получить из фундаментальной моды, данный вариант является вполне корректным.

2) Перейти на другой ПВ, сделать инверсию для обеих мод на нём, использовать получившуюся модель для остальных пунктов приёма. Данный вариант также является корректным, однако мы не застрахованы от того, что на следующем ПВ начальная модель будет достаточно хороша для того, чтобы инверсия сошлась для обеих мод (в противном случае придётся прибегнуть к варианту 1 и на этом ПВ).

Воспользуемся первым способом. Отключим высшую моду в списке кривых и запустим процесс подбора, нажав Run Inversion. Результат показан на картинке:



Теперь включим высшую моду и запустим процесс еще раз. Это будет означать, что теперь мы используем начальную модель, полученную инверсией фундаментальной моды, для инверсии обеих мод. Видно, что при таком подходе инверсия завершилась успешно, кривые подобраны, модель поперечных скоростей обновилась по итогам совместного подбора двух мод.



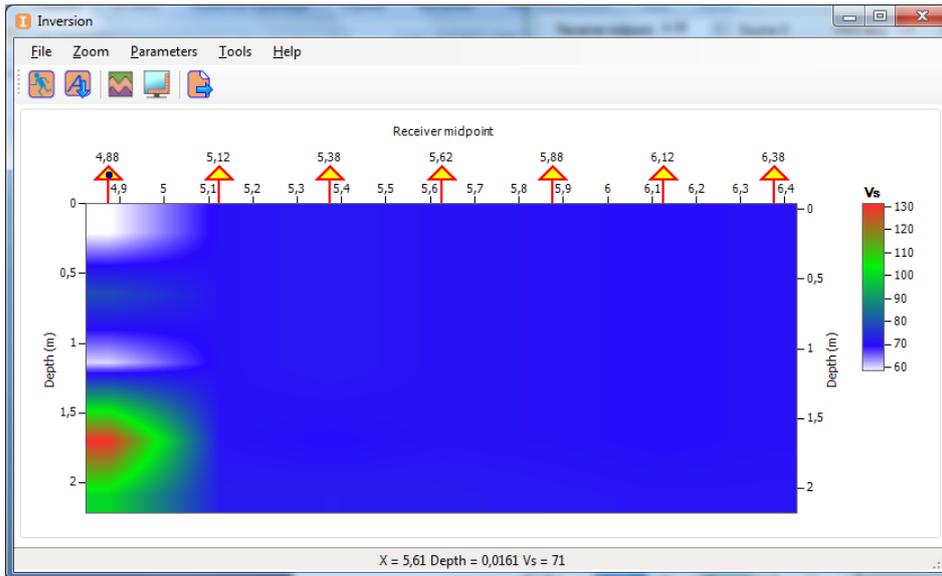
Примечание 4

Данный подход не является обязательным и единственным, он был продемонстрирован для ознакомления с некоторыми возможностями программы и возможными подходами к решению задач, которые могут возникнуть в процессе обработки данных поверхностных волн. Во многих случаях инверсия работает с

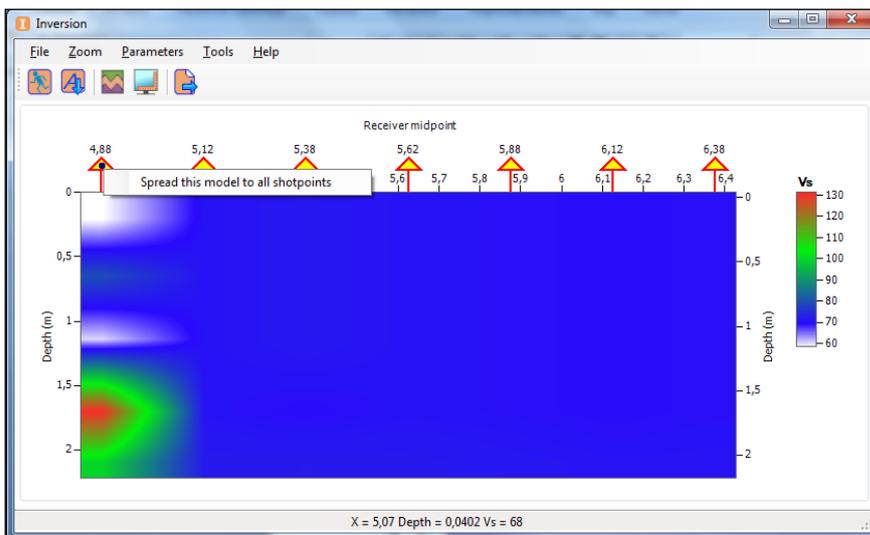
исходной автоматически заполненной моделью для обеих мод сразу. В этом можно убедиться на текущем примере, запустив инверсию для других ПВ.

Важным моментом также является тот факт, что пикировки сделанные пользователем могут отличаться от тех, что приведены на картинках выше. Это означает, что начальная модель также может немного измениться. Другая начальная модель может привести к другим результатам инверсии (например, инверсия может сойтись для двух мод сразу на первом ПВ).

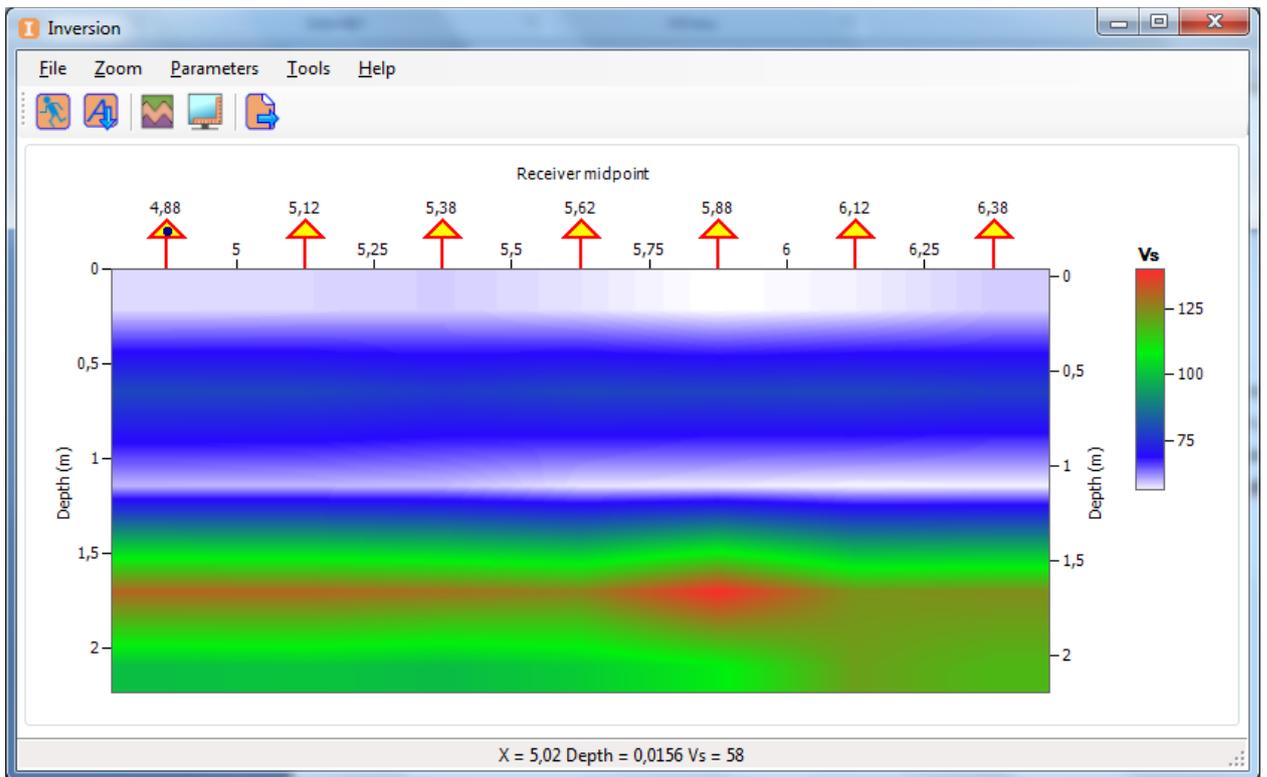
Нажмите кнопку Apply – текущая модель для ПВ 0 отобразится в окне итоговой модели Inversion:



Как уже было сказано ранее, процесс подбора кривых сильно зависит от выбора начальной модели. Поэтому поступим следующим образом – распространим модель, подобранную на первом ПВ на остальные ПВ, тем самым используя её как начальную. Для этого в окне **Inversion** нажмем правой кнопкой мыши на треугольнике этого ПВ и выберем опцию **Spread this model to all shot points**.



Теперь, имея достаточно реалистичную начальную модель для всех ПВ, запустим инверсию для всего профиля, нажав кнопку Run Inversion  на панели задач. Результат инверсии показан на картинке:



Для проверки качества подбора кривых на любом из ПВ необходимо двойным щелчком кликнуть на треугольник ПВ – появится окно подбора для данной кривой. Данное изображение представляет собой распределение скоростей поперечных волн и является итоговым результатом, который может быть выгружен в сеточный файл (*.grd) для дальнейших работ.

Приложение

Методика проведения полевых работ по методу многоканального анализа поверхностных волн

Выбор параметров расстановки при проведении наблюдений по методу MASW напрямую связан с желаемой горизонтальной и вертикальной разрешающей способностью. Длина приемной линии (D) связана с максимальной длиной волны (λ_{\max}): $D \approx \lambda_{\max}$, при этом максимальная глубина, для которой может быть восстановлена скорость поперечных волн, определяется как половина наибольшей длины волны: $Z_{\max} \approx \lambda_{\max}/2$.

С другой стороны – расстояние между приемниками (dx) связано с минимальной длиной волны (λ_{\min}) и, соответственно, минимальной глубиной исследования (Z_{\min}): $dx \approx \lambda_{\min}$, $Z_{\min} \approx \lambda_{\min}/2$. На практике, однако, основным фактор, определяющий максимальную длину волны – источник. Обычно, это первые десятки метров.

В качестве приёмников рекомендуется использовать низкочастотные (4.5 Гц) вертикальные приёмники. Использование низкочастотных приёмников позволяет добиться регистрации волн с большей длиной волны, что соответственно увеличивает глубинность метода. Использование более высокочастотных приёмников также допустимо.

Расстояние источник – первый приемник чаще всего выбирается от 1 до 4-х расстояний dx . Наиболее используемый тип наблюдений при проведении работ по данному методу – «профилирование», т.е. источник перемещается вместе с приемной расстановкой на определенный шаг, который выбирается исходя из горизонтальной разрешающей способности метода.