



Обработка данных, полученных по методу
многоканального анализа поверхностных волн
(MASW) в программе RadExPro – практическое
руководство (редакция 06.06.2011)

ООО «Деко-геофизика СК»
Научный парк МГУ
Ленинские горы 1-77
119992 Москва, Россия
Тел./Факс: (+7 495) 930 94 14
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	5
Методика проведения полевых работ по методу многоканального анализа поверхностных волн	12
Присвоение геометрии	12
Работа с модулем MASW	17
Задание схемы обработки	17
Расчет дисперсионных изображений	19
Процедура инверсии	23

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 – 6 записей в формате SEG-Y.

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.

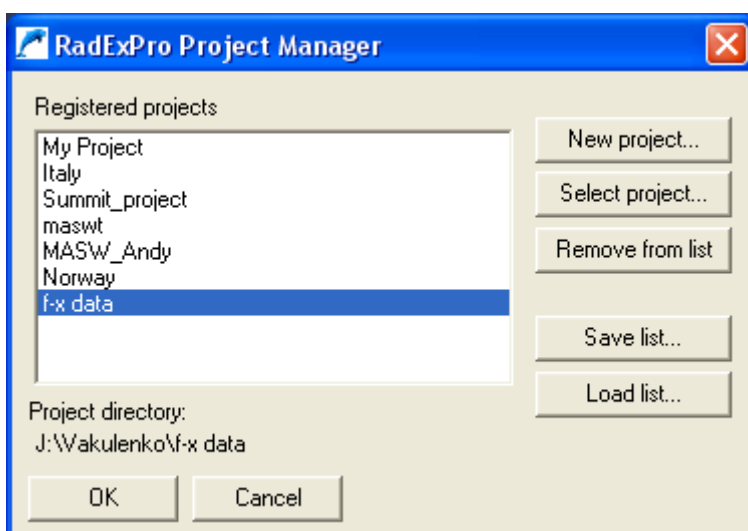
Создание проекта в RadExPro

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.

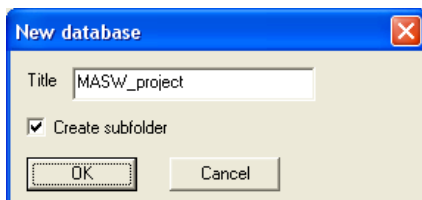
Проект можно переносить с компьютера на компьютер простым копированием папки (при условии, что все используемые данные хранятся внутри этой папки). Создадим новый проект обработки. Запустите программу через меню Пуск или иконку на рабочем столе:



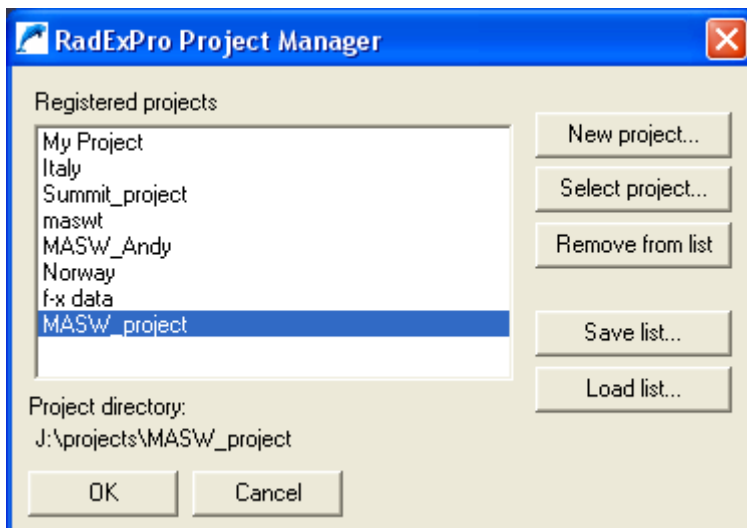
Появится менеджер проектов. При этом откроется диалоговое окно, содержащее список зарегистрированных проектов.



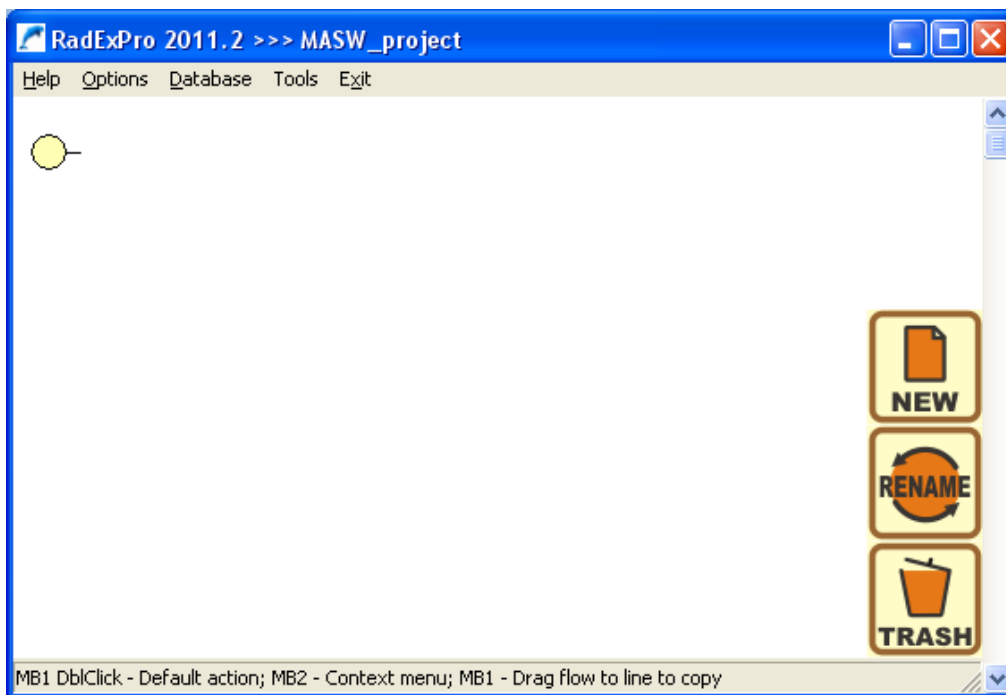
Нажмите на кнопку New Project и выберите родительский каталог на диске, в котором будет создан подкаталог с проектом. После этого, в появившемся окне, введите имя проекта.



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.

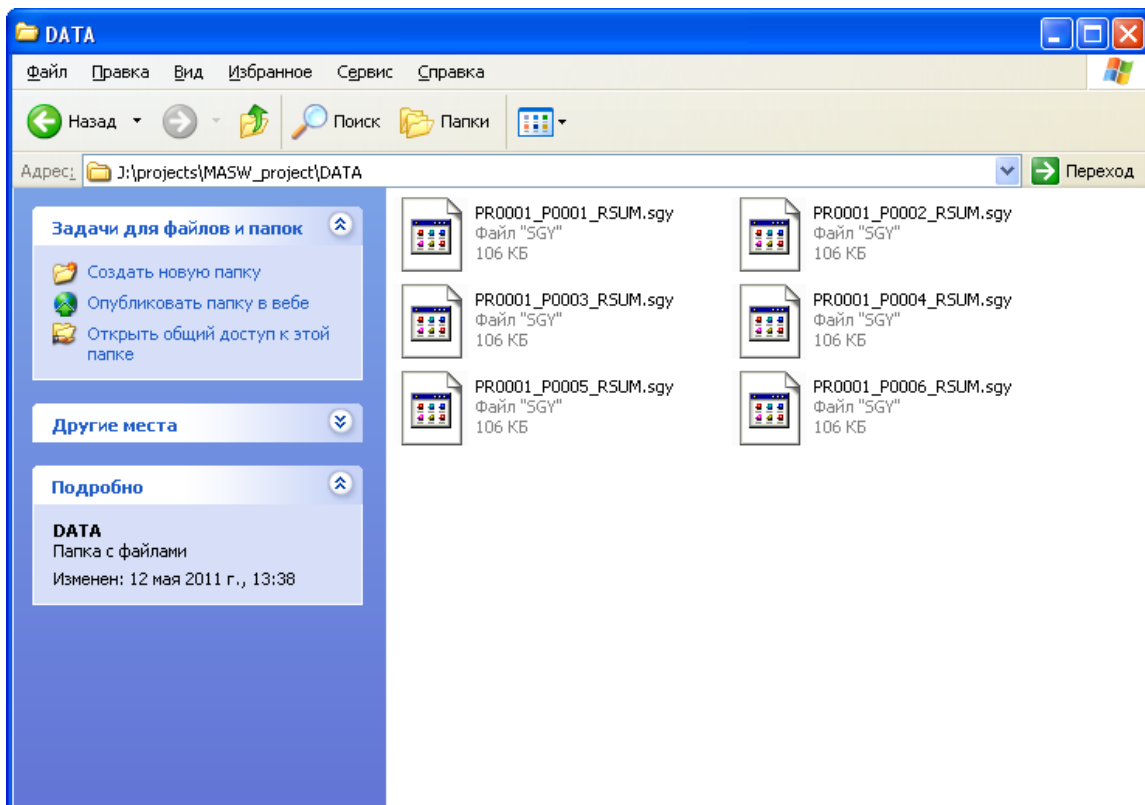


Появится главное окно программы RadExPro, содержащее дерево проекта. Пока это дерево пусто.



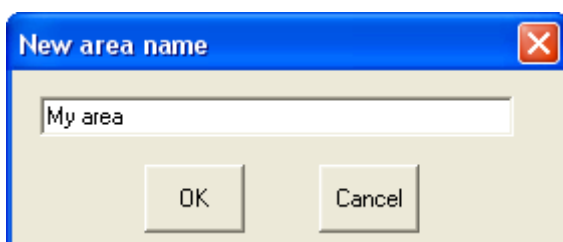
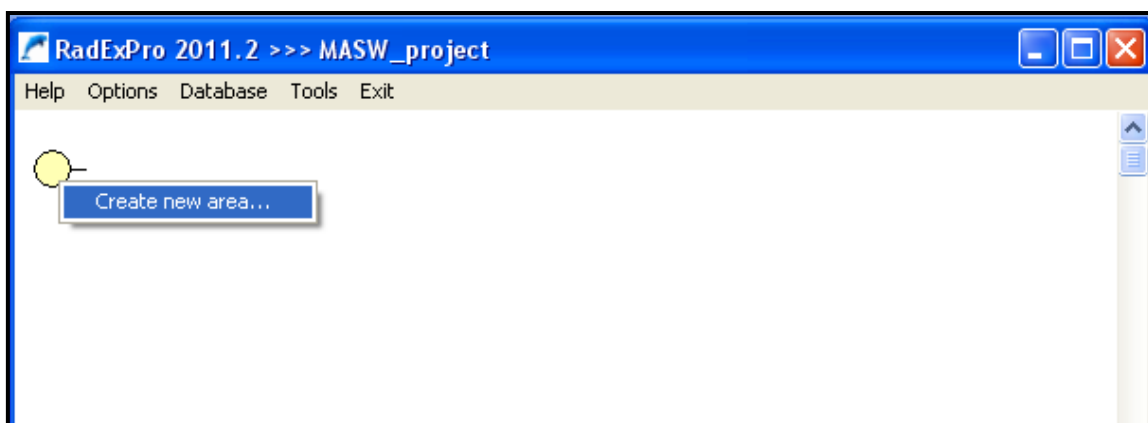
Загрузка исходных данных в проект

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

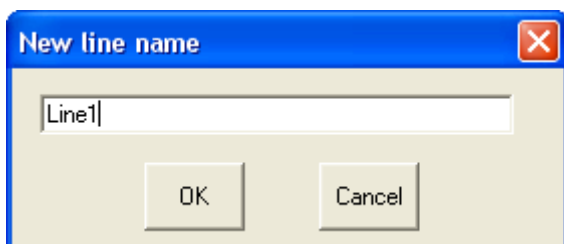
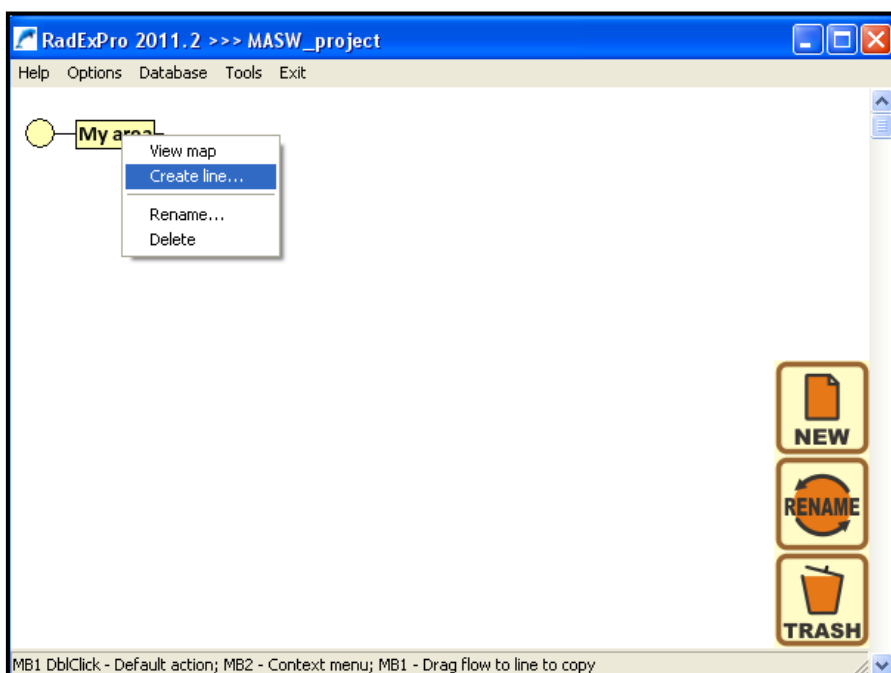


Хранение данных внутри каталога проекта позволяет пакету использовать относительные пути до файлов с данными вместо абсолютных, что облегчает перенос проектов с компьютера на компьютер.

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.

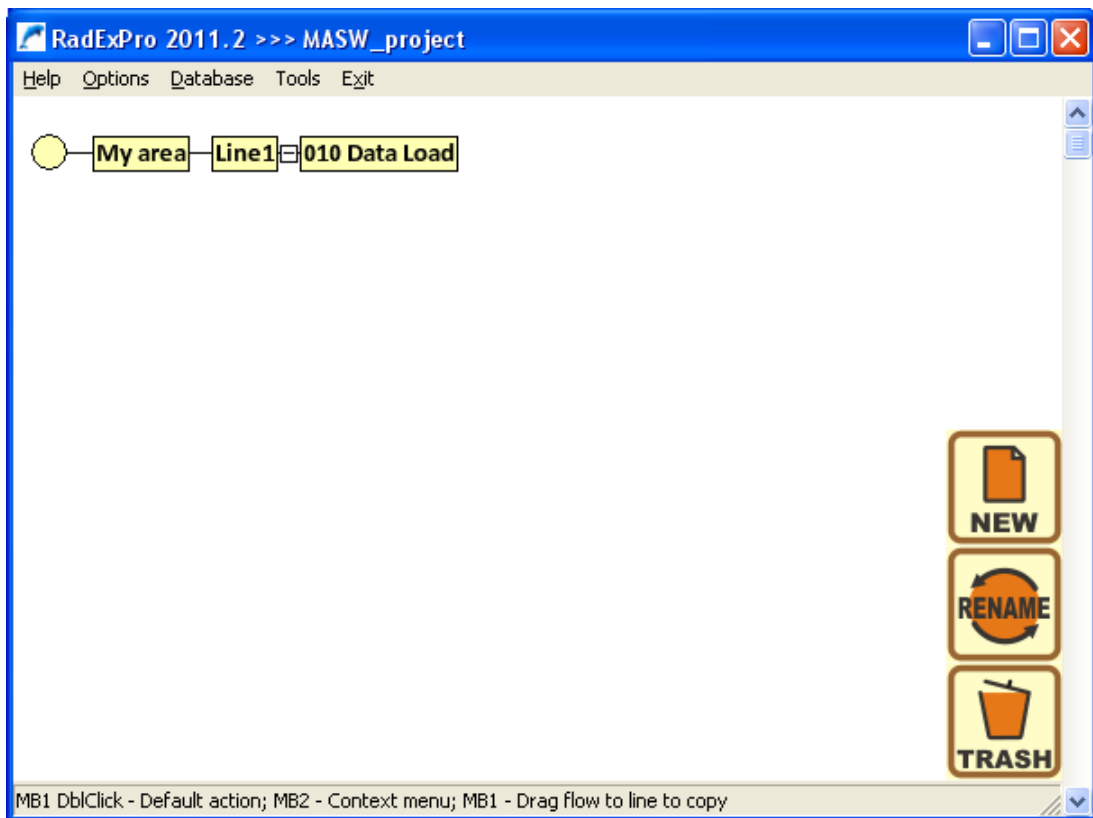


Аналогично, кликнув правой кнопкой мыши на желтом прямоугольнике с названием площади, выберите пункт Create line и создайте новый профиль

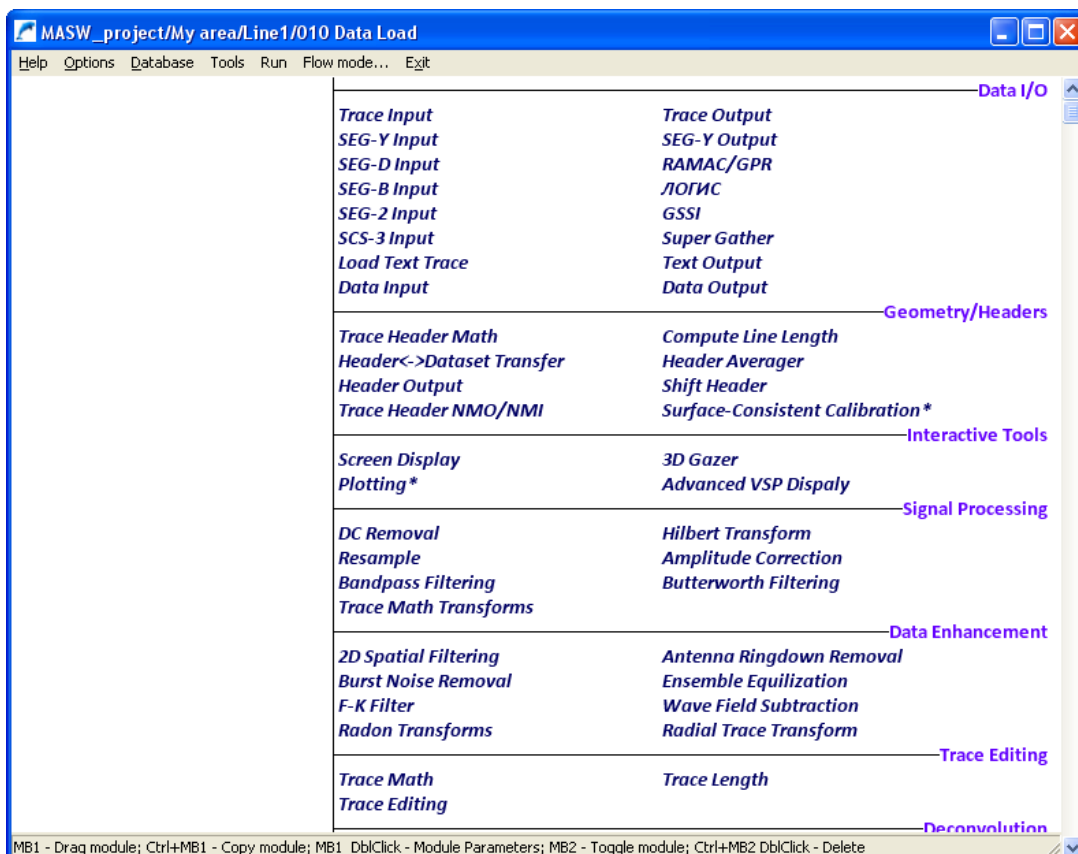


База данных позволяет в рамках одного проекта хранить несколько площадей, в каждой из площадей – несколько профилей, каждый профиль обрабатывается в нескольких потоках. По аналогии с созданием площади и профиля, создадим поток обработки *010 – Data Load*.

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.

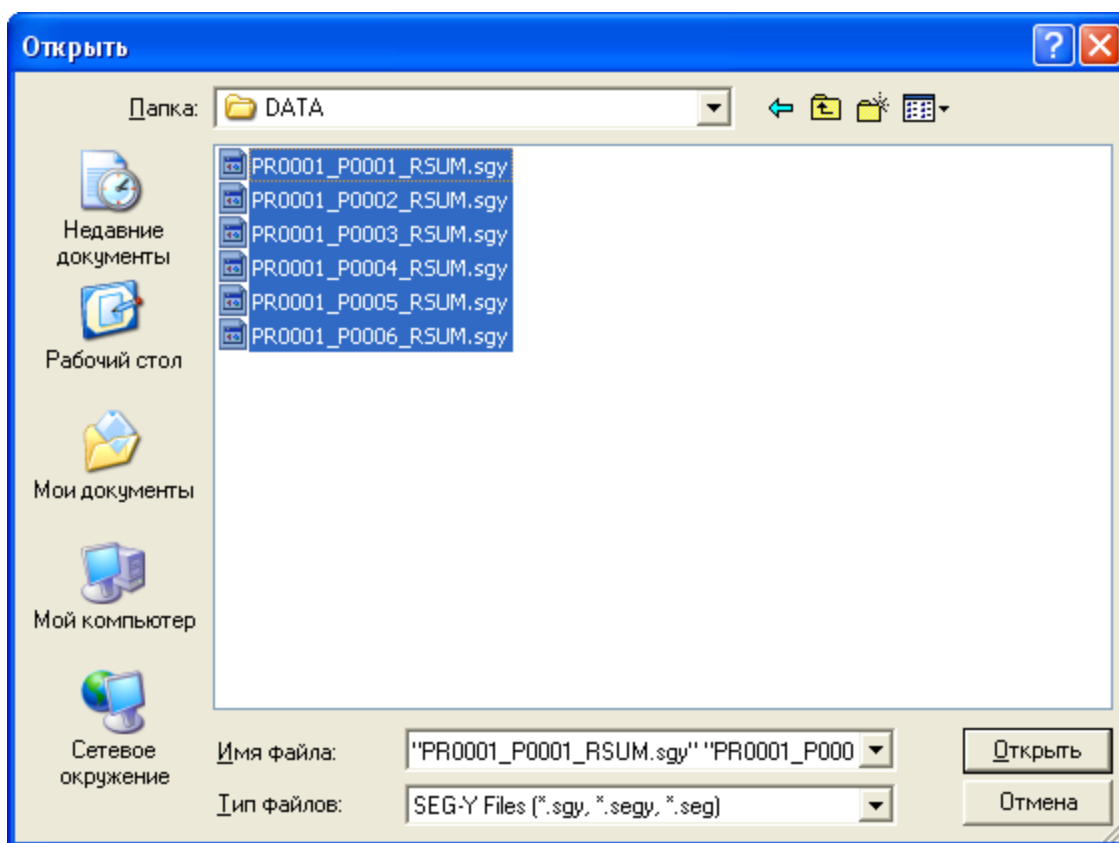


Создадим поток, состоящий из модулей SEG-Y Input и Trace Output (оба модуля располагаются в группе Data I/O – ввод-вывод данных). Этот поток будет читать данные из SEG-Y-файла на диске и записывать их в базу данных проекта в виде объекта базы – «набора данных».

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.

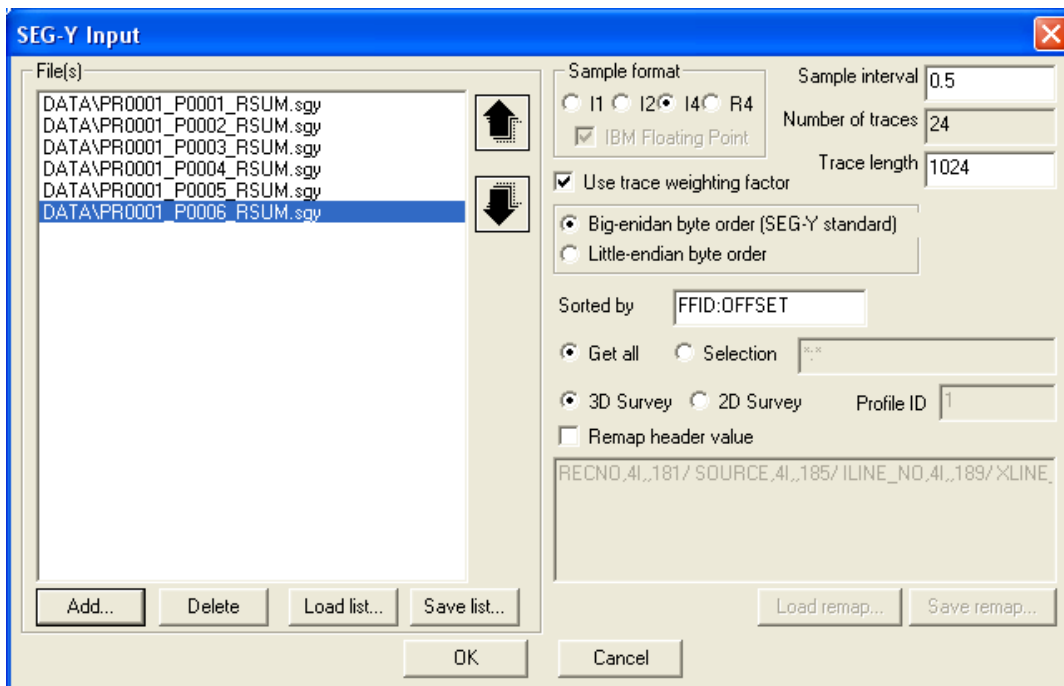
Из группы Data I/O добавим в поток модуль SEG-Y Input.

Добавим полученные данные, нажав кнопку Add и указав местоположение файлов (они были скопированы в папку DATA текущего проекта). Каждый файл *.sgy соответствует одному ПВ на профиле. Для удобства при дальнейшей обработке загрузим все ПВ в один набор данных. Для этого необходимо выбрать все файлы в папке и нажать «Открыть».

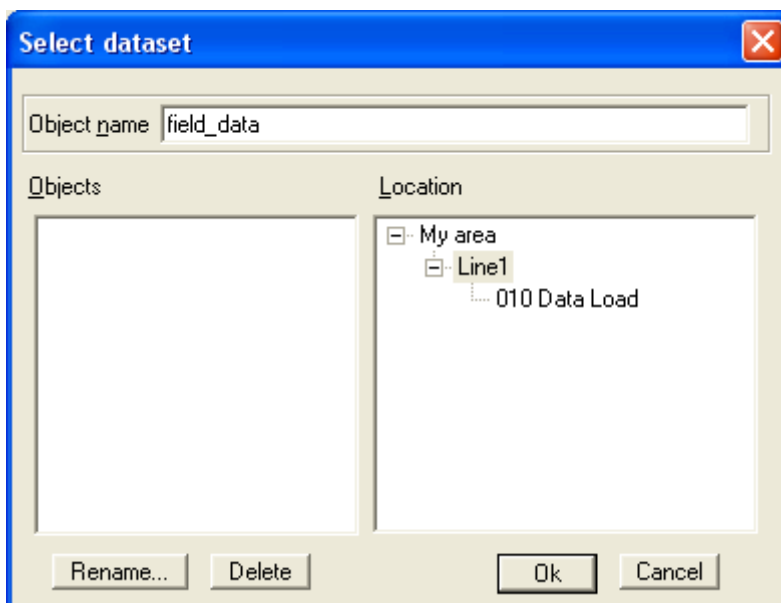


Список добавленных файлов отобразится в левой части модуля. В правой части задаются параметры и формат записи файлов (они определяются автоматически, однако всегда могут быть изменены в случае неправильного определения программой). В нашем случае автоматически определенные параметры верны.

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

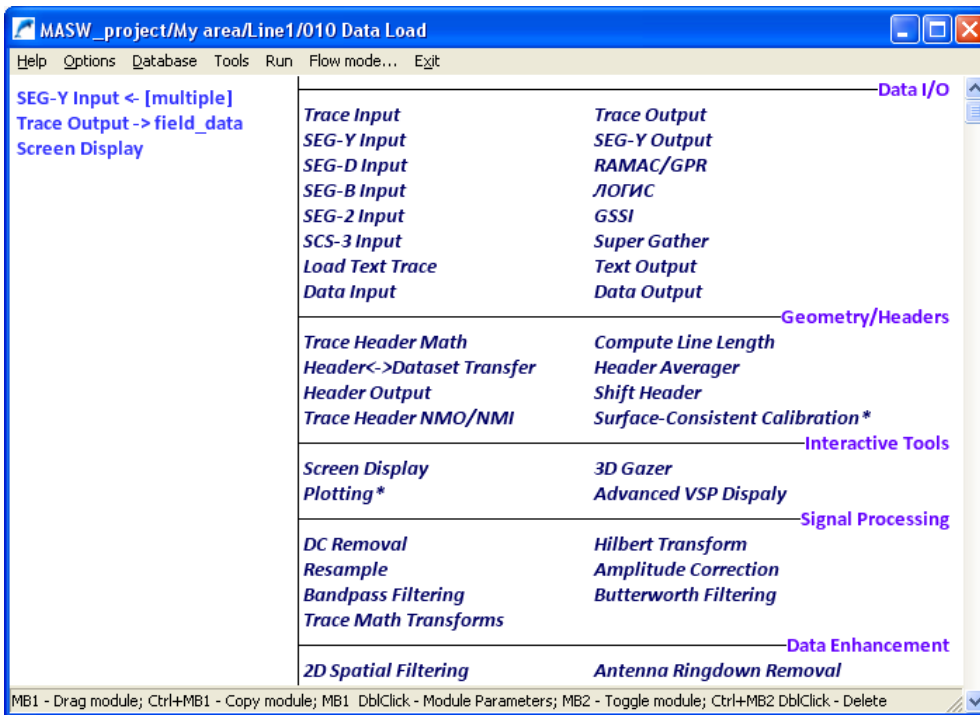


После модуля SEG-Y Input в поток добавим модуль Trace Output, который должен сохранить прочитанные данные в базу данных. Объект, который будет содержать эти данные, назовём field_data и разместим его на втором уровне базы данных в профиль Line1:

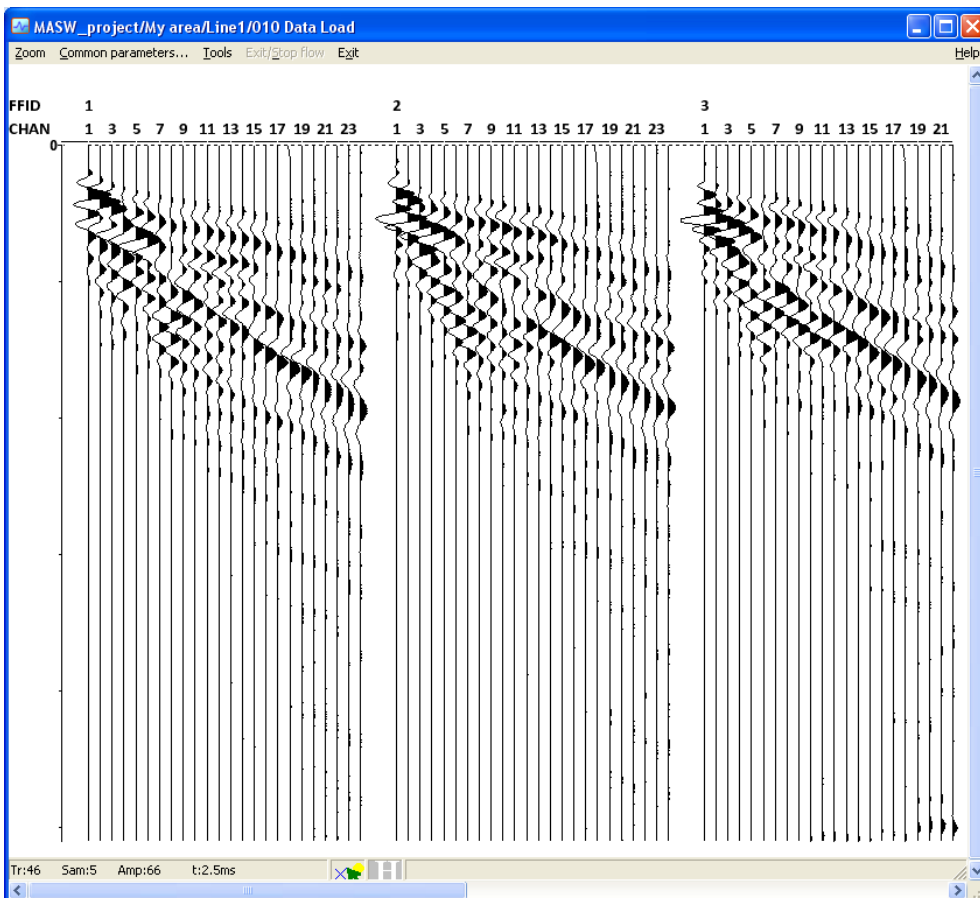


Также, для контроля загруженных данных, после модуля Trace Output добавьте в поток модуль Screen Display.

Полученный поток должен выглядеть следующим образом:



Для выполнения потока выберите команду меню Run. В результате должно открыться окно Screen Display, отображающее вводимые данные, а сами данные будут прочитаны из файла на диске и записаны в базу данных. Окно Screen Display, которое должно появиться на экране, приведено ниже.



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, основной 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.

Присвоение геометрии

Параметры съемки:

В качестве данных были взяты данные, полученные по следующей методике: Линия приёма – 24 канала, расстояние между каналами - 1 м (вертикальные сейсмоприемники). Расстояние источник – первый приемник – 5 м. Вся расстановка двигалась через 1 м.

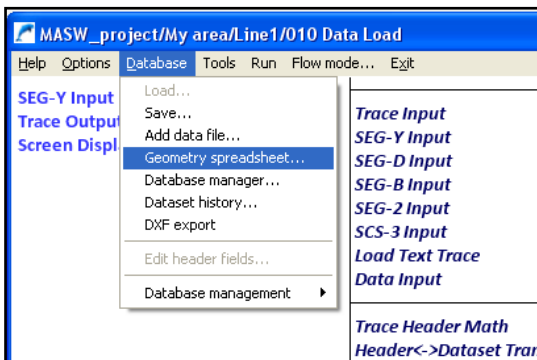
Присвоение геометрии к сейсмическим данным заключается в том, что для каждой трассы определяется ряд значений, которые, затем, сохраняются в указанные поля заголовков набора данных в базе данных проекта.

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

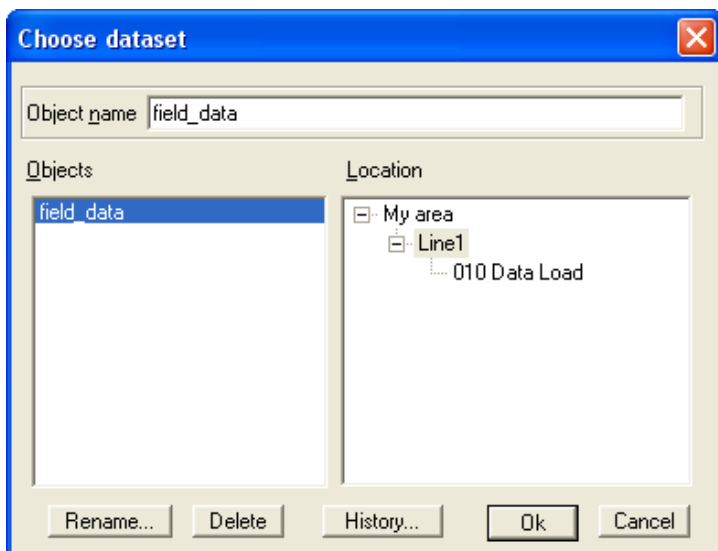
1. Номер пункта возбуждения (FFID)
2. Номер канала (CHAN)
3. Координата источника (SOU_X)
4. Координата приемника (REC_X)
5. Расстояние между источником и приемником (OFFSET)

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.

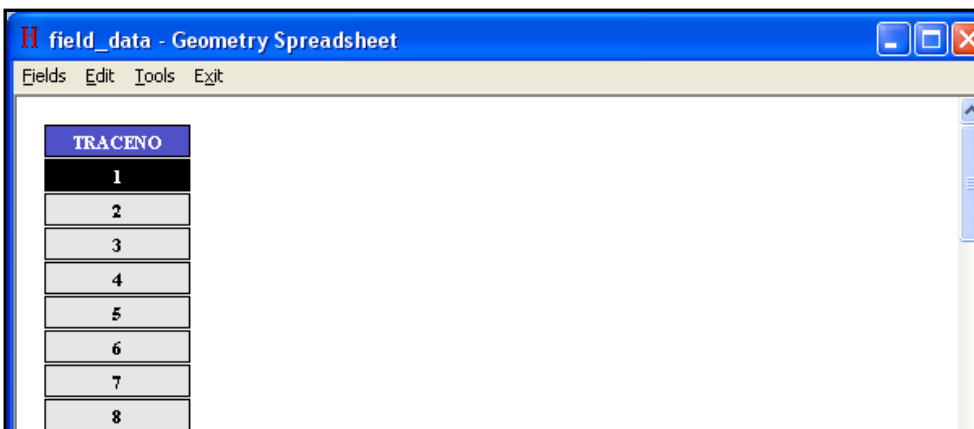
Для манипуляций с полями заголовков сейсмических данных, в пакете RadExPro используется средство Geometry Spreadsheet. Выберите пункт меню Database/Geometry Spreadsheet...



Затем выберите набор сейсмических данных, геометрию которых нужно редактировать.

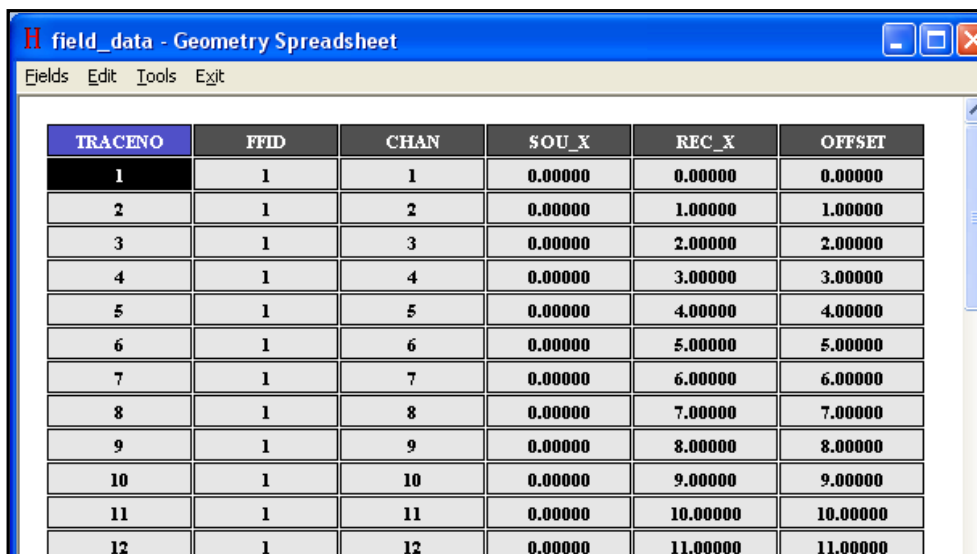


В результате появится окно редактирования заголовков:



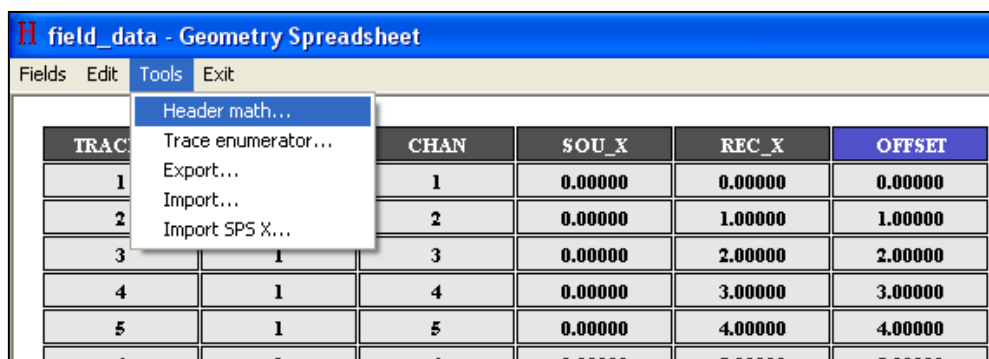
Для того чтобы отобразить требуемые поля заголовков (все объявленные в базе данных поля заголовков уже существуют, но не отображаются), воспользуйтесь опцией меню Fields / Add fields... В открывшемся диалоговом окне, удерживая нажатой кнопку Ctrl, выберите следующие поля заголовков: FFID, CHAN, SOU_X, REC_X, OFFSET.

В результате окно редактора заголовков должно выглядеть так:



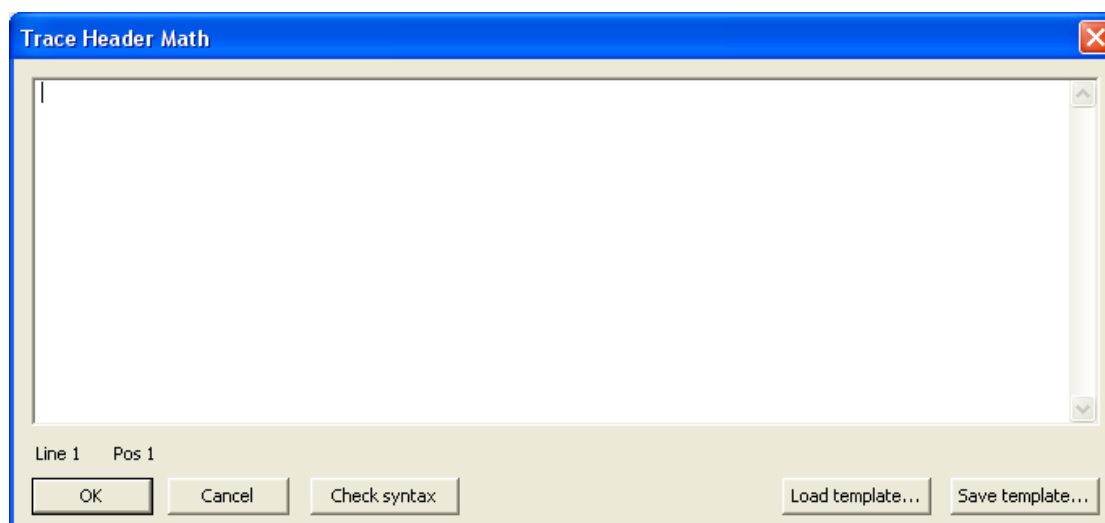
TRACENO	FFID	CHAN	SOU_X	REC_X	OFFSET
1	1	1	0.00000	0.00000	0.00000
2	1	2	0.00000	1.00000	1.00000
3	1	3	0.00000	2.00000	2.00000
4	1	4	0.00000	3.00000	3.00000
5	1	5	0.00000	4.00000	4.00000
6	1	6	0.00000	5.00000	5.00000
7	1	7	0.00000	6.00000	6.00000
8	1	8	0.00000	7.00000	7.00000
9	1	9	0.00000	8.00000	8.00000
10	1	10	0.00000	9.00000	9.00000
11	1	11	0.00000	10.00000	10.00000
12	1	12	0.00000	11.00000	11.00000

В данном примере заголовки FFID, CHAN заполнены верно, а заголовки SOU_X, REC_X, OFFSET – неверно. Для редактирования заголовков воспользуемся стандартным средством пакета – Trace header math.



TRACENO	FFID	CHAN	SOU_X	REC_X	OFFSET
1	1	1	0.00000	0.00000	0.00000
2	1	2	0.00000	1.00000	1.00000
3	1	3	0.00000	2.00000	2.00000
4	1	4	0.00000	3.00000	3.00000
5	1	5	0.00000	4.00000	4.00000
6	1	6	0.00000	5.00000	5.00000

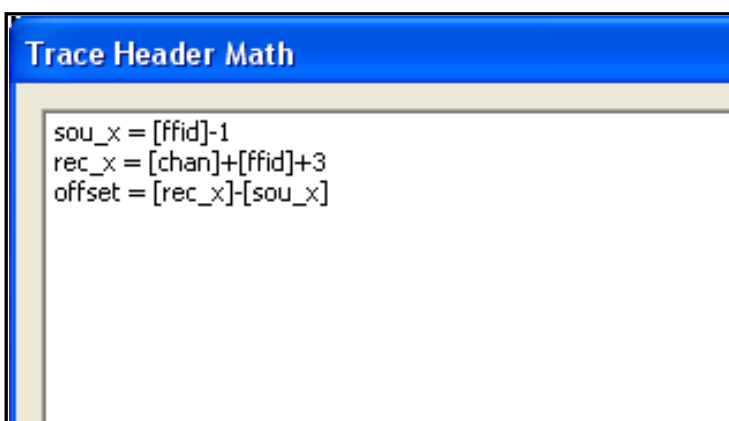
Trace header math позволяет выполнять различные математические процедуры с заголовками трасс. Подробное описание всех доступных процедур можно найти в Руководстве пользователя.



Line 1 Pos 1

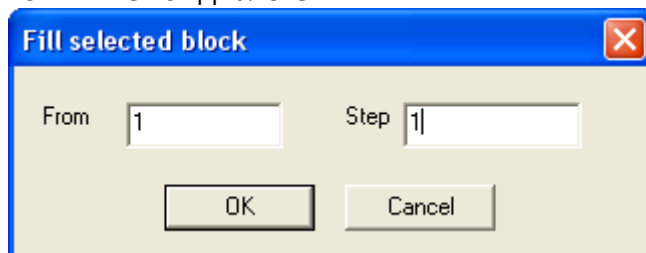
OK Cancel Check syntax Load template... Save template...

Отталкиваясь от значений заголовков FFID,CHAN, которые заполнены верно, воспользуемся следующими формулами для заполнения остальных:



Примечание: часто бывает, что поля FFID и CHAN не заполнены или заполнены неверно. Для того чтобы присвоить им значения согласно параметрам наших наблюдений можно поступить следующим образом:

1. Перенумеровать поле TRACENO значениями, начиная от 1 с шагом 1. Для этого нужно в Geometry Spreadsheet щелкнуть левой кнопкой мыши по заголовку TRACENO (синий прямоугольник) – в результате выделится весь столбец значений, нажать кнопку Insert на клавиатуре, и указать начальное значение и шаг в появившемся диалоге:



2. Использовать следующие формулы:
$$\text{ffid} = \text{trunc}([\text{traceno}] - 1) / 24 + 1$$
$$\text{chan} = \text{fmod}([\text{traceno}] - 1, 24) + 1$$

Итоговый результат выглядит следующим образом:

TRACENO	FFID	CHAN	\$OU_X	REC_X	OFFSET
1	1	1	0.00000	5.00000	5.00000
2	1	2	0.00000	6.00000	6.00000
3	1	3	0.00000	7.00000	7.00000
4	1	4	0.00000	8.00000	8.00000
5	1	5	0.00000	9.00000	9.00000
6	1	6	0.00000	10.00000	10.00000
7	1	7	0.00000	11.00000	11.00000
8	1	8	0.00000	12.00000	12.00000
9	1	9	0.00000	13.00000	13.00000
10	1	10	0.00000	14.00000	14.00000
11	1	11	0.00000	15.00000	15.00000
12	1	12	0.00000	16.00000	16.00000
13	1	13	0.00000	17.00000	17.00000
14	1	14	0.00000	18.00000	18.00000
15	1	15	0.00000	19.00000	19.00000
16	1	16	0.00000	20.00000	20.00000
17	1	17	0.00000	21.00000	21.00000
18	1	18	0.00000	22.00000	22.00000
19	1	19	0.00000	23.00000	23.00000
20	1	20	0.00000	24.00000	24.00000
21	1	21	0.00000	25.00000	25.00000
22	1	22	0.00000	26.00000	26.00000
23	1	23	0.00000	27.00000	27.00000
24	1	24	0.00000	28.00000	28.00000
25	2	1	1.00000	6.00000	5.00000
26	2	2	1.00000	7.00000	6.00000
27	2	3	1.00000	8.00000	7.00000
28	2	4	1.00000	9.00000	8.00000

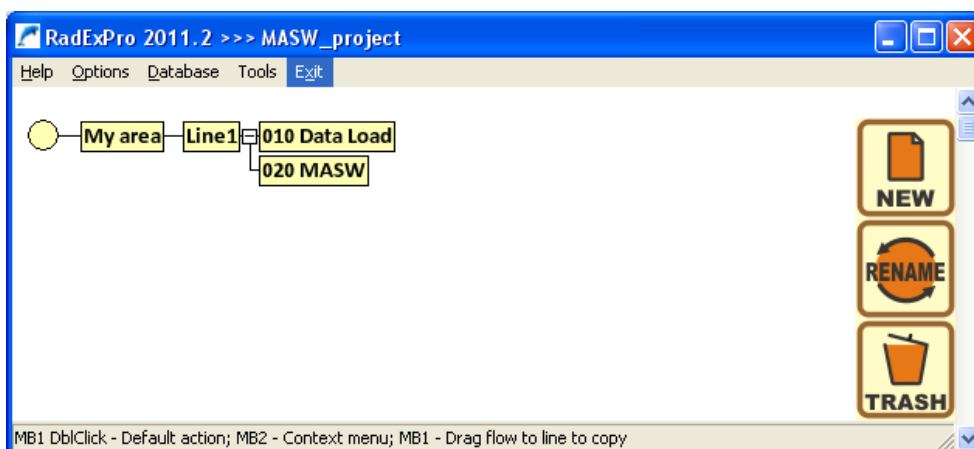
Сохраните полученный результат с помощью пункта меню Edit-> Save changes и выйдите из редактора геометрии, нажав Exit.

После того как геометрия наблюдений присвоена, можно непосредственно переходить к работе с модулем многоканального анализа поверхностных волн.

Работа с модулем MASW

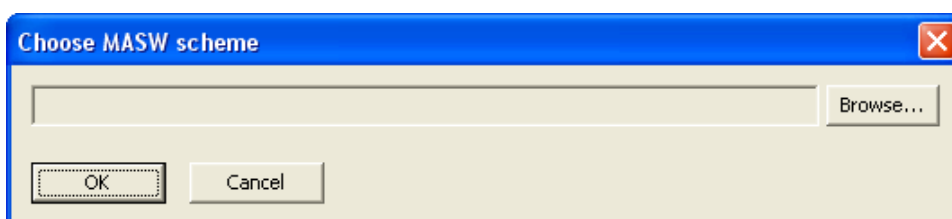
Задание схемы обработки

Создайте новый поток “020 – MASW”:

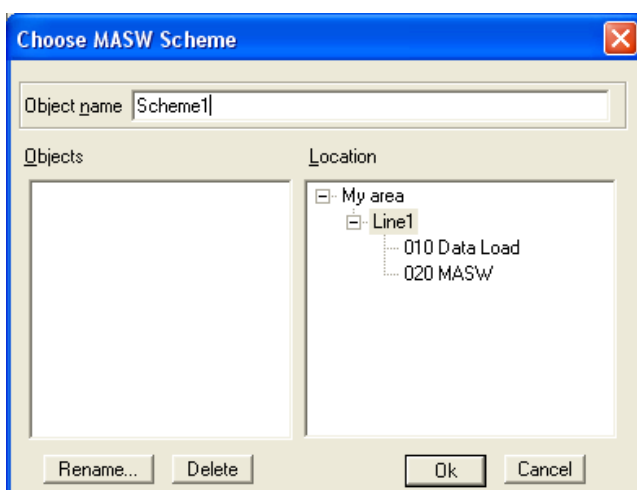


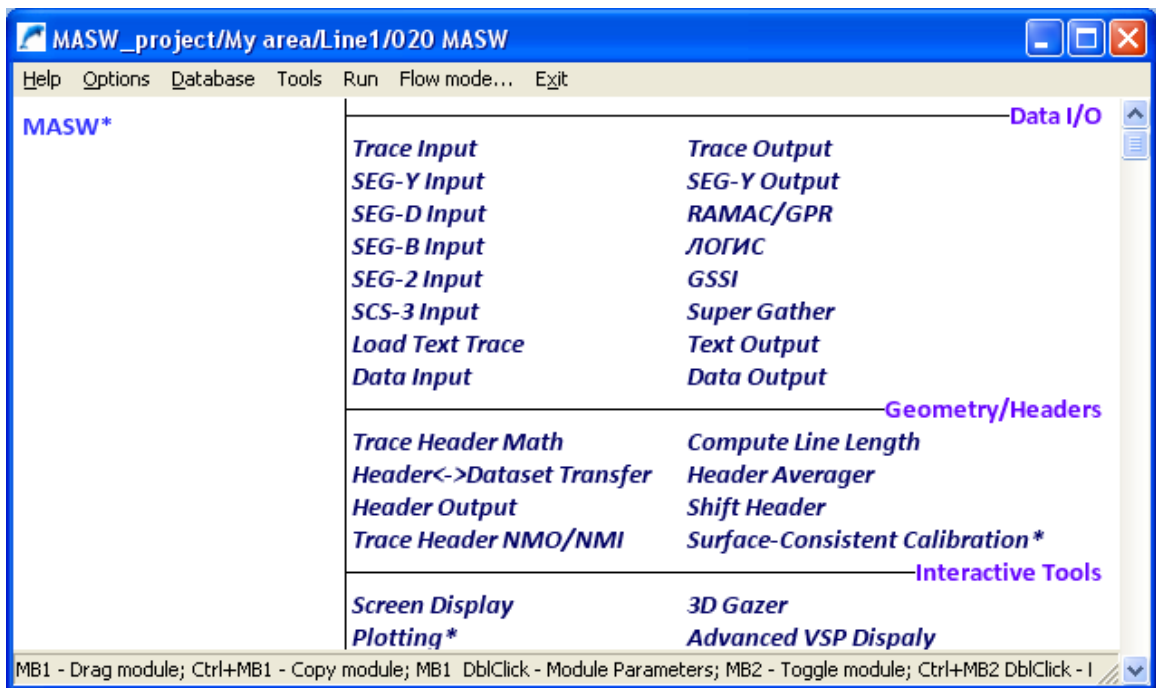
Зайдите в поток и добавьте модуль MASW, находящийся в группе Surface Wave Analysis. Обработка данных производится в рамках той или иной схемы обработки. Схема представляет собой совокупность дисперсионных изображений, соответствующих им кривых, результирующей модели, а также параметров расчета и визуализации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

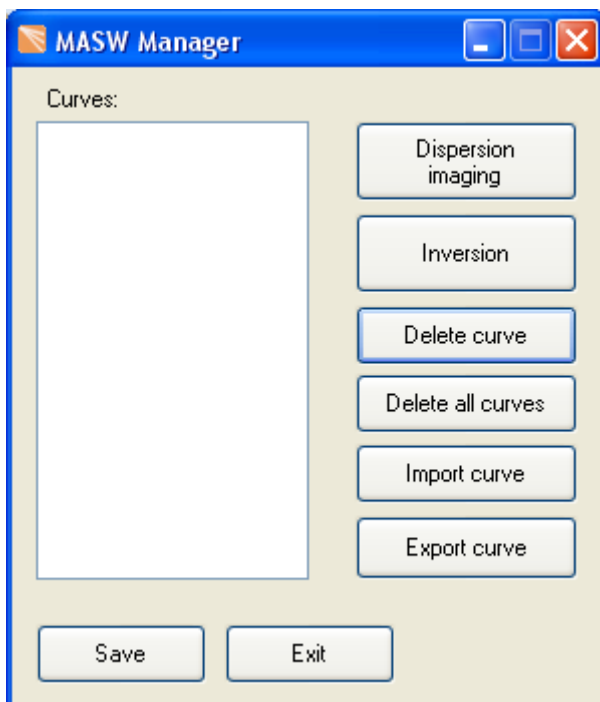


Назовем схему Scheme1 и сохраним ее на уровне текущей линии. По нажатию на кнопку OK модуль появится в списке.



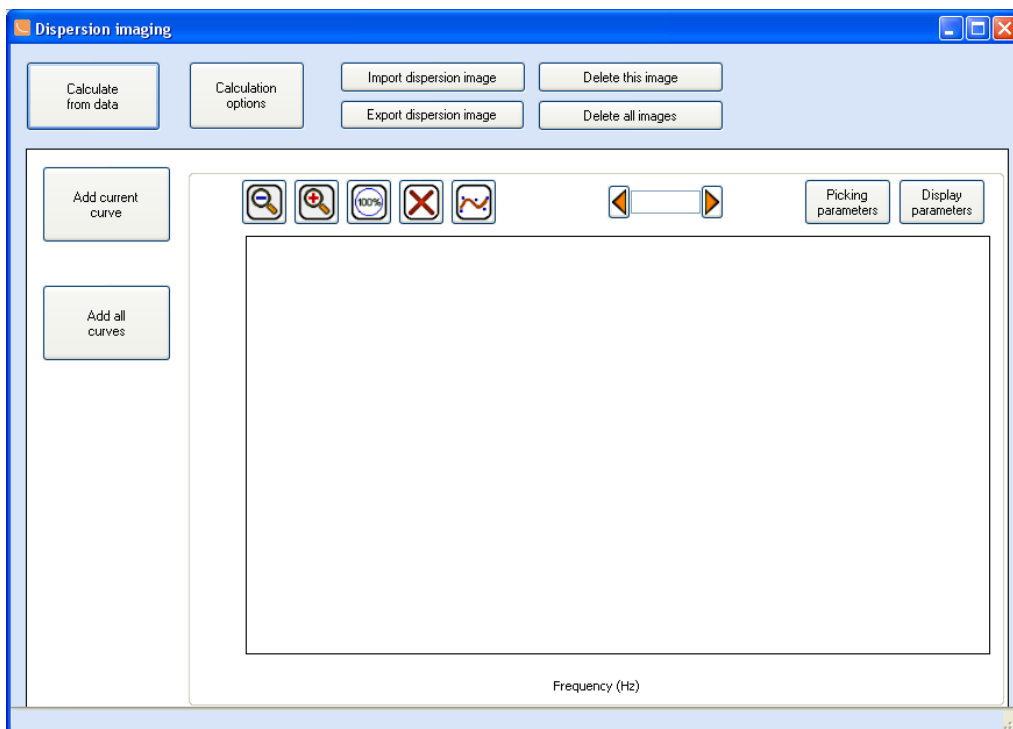


Запустите модуль, нажав кнопку Run. В результате появится главное окно управления проектом – “MASW Manager”. В левой части данного окна отображается список всех дисперсионных кривых, которые были добавлены в схему. Кривые сортируются по заголовку SOU_X в возрастающем порядке. Пока ни одного изображения не было обработано и добавлено, окно управления проектом “MASW Manager” будет пустым.

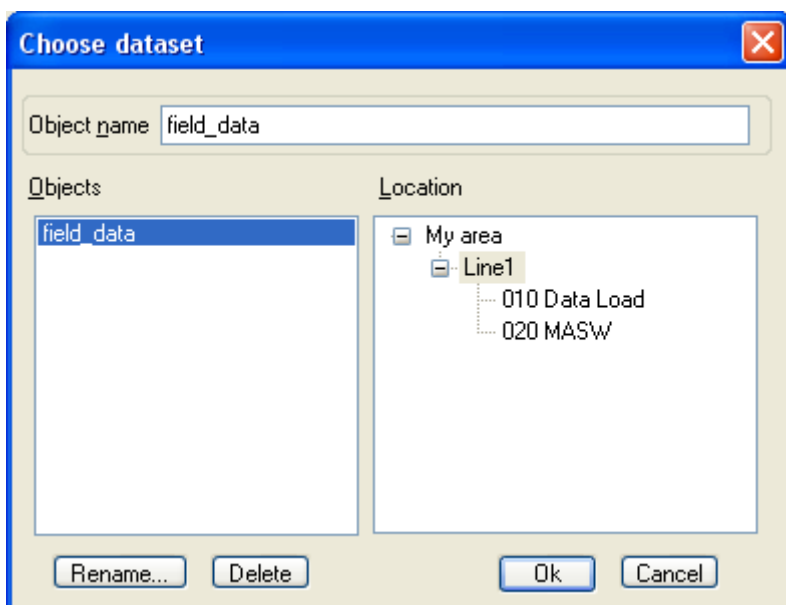


Расчет дисперсионных изображений

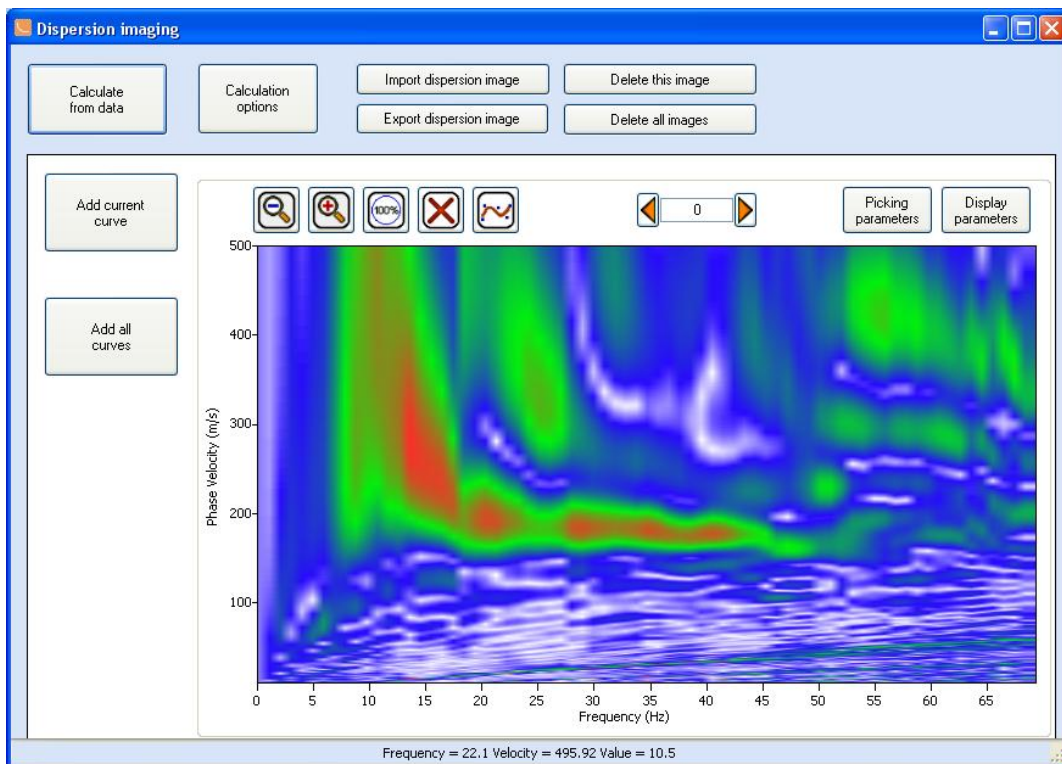
Нажмите кнопку Dispersion Imaging - появится окно расчета дисперсионных изображений и работы с ними:



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



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




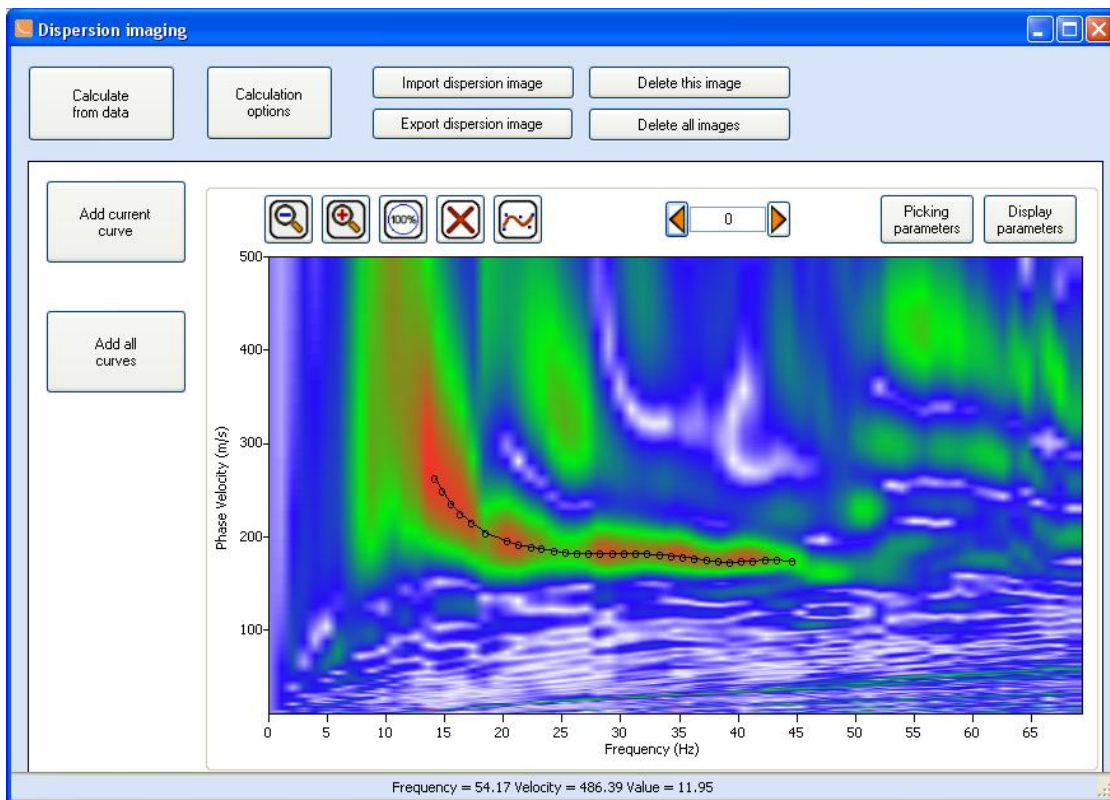
Дисперсионные изображения рассчитываются автоматически для всех ПВ в текущем наборе данных (в нашем случае будет рассчитано 6 дисперсионных изображений).

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 позволяют получить достаточно информативное дисперсионное изображение, изменение диапазонов не требуется.



После того, как дисперсионное изображение появилось на экране, необходимо «извлечь» дисперсионную кривую путём пикировки изображения по максимуму амплитуд. По умолчанию активирован режим автоматической пикировки - точки автоматически расставляются между первой и последней по максимуму амплитуд в указанном окне с заданным шагом, параметры задаются опцией **Picking parameters**.

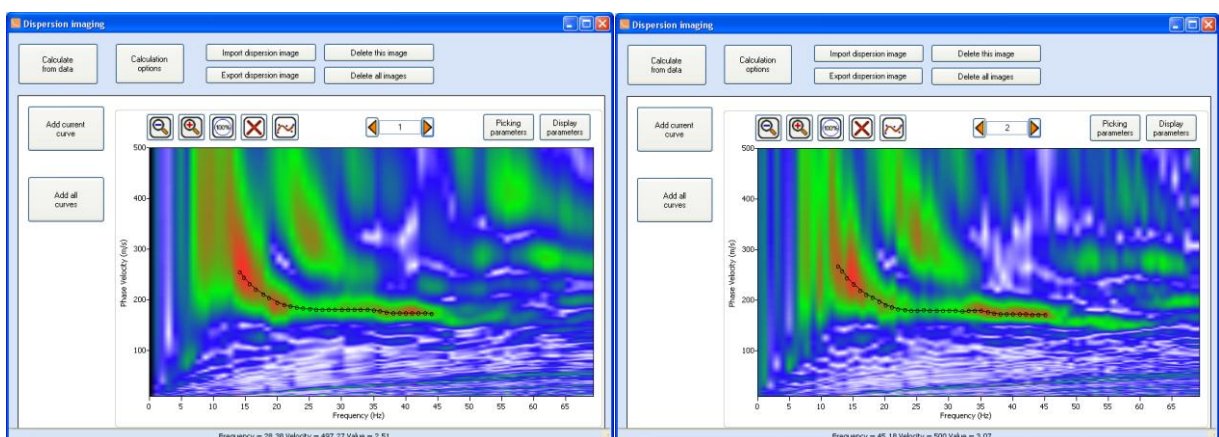
Щелкните один раз левой кнопкой мыши на максимуме в левой части дисперсионного изображения и один раз на максимуме в правой части изображения (как показано на рисунке ниже). В результате дисперсионное изображение будет пропикировано по всем максимумам амплитуд с заданным шагом между этих двух точек.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

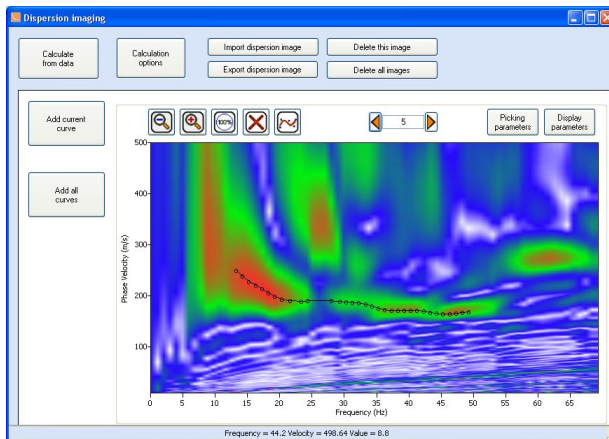
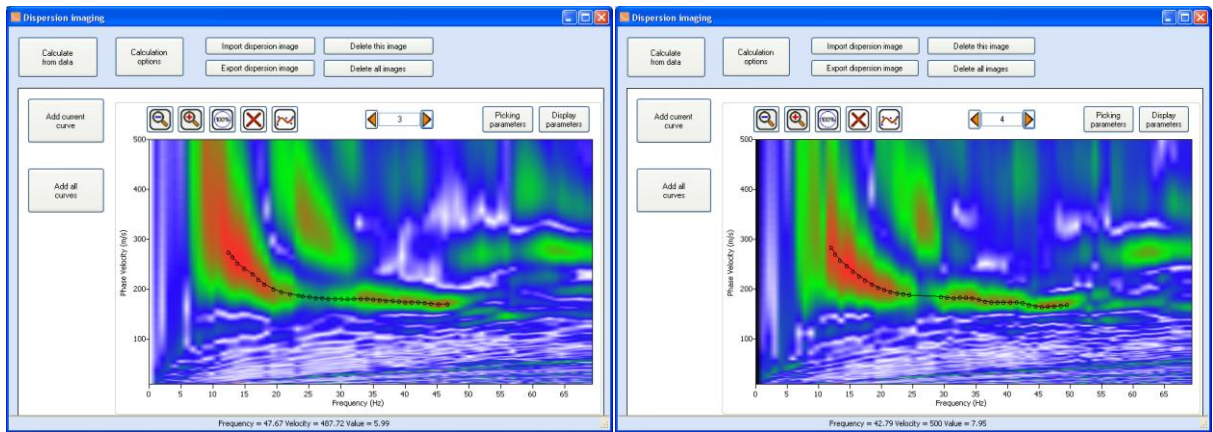
Сглаживание пикировки производится нажатием на кнопку сглаживания  на панели инструментов. Добейтесь пикировки, схожей с картинкой:



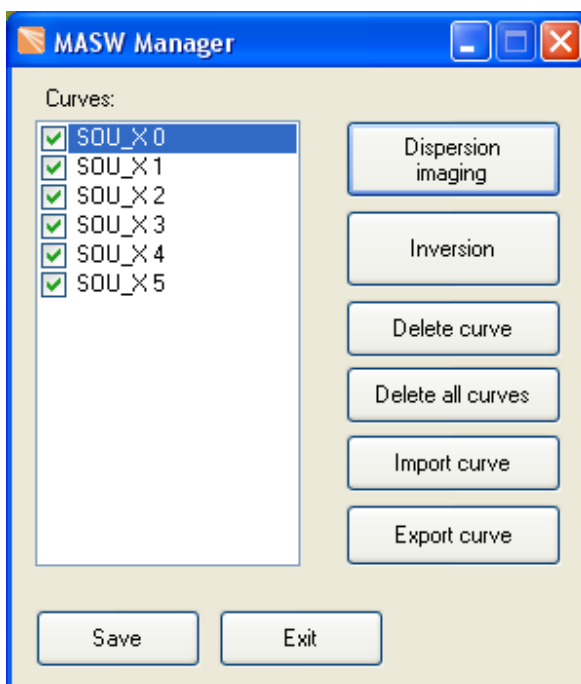
! Выделение фундаментальной моды на дисперсионном изображении не всегда является простой и однозначной процедурой. Оно может быть осложнено как преобладанием высших мод, так и достаточно широким максимумом на нижних частотах. Следует иметь ввиду, что изменение пикировки в относительно небольших пределах может вызывать достаточно сильное 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 получены, 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.

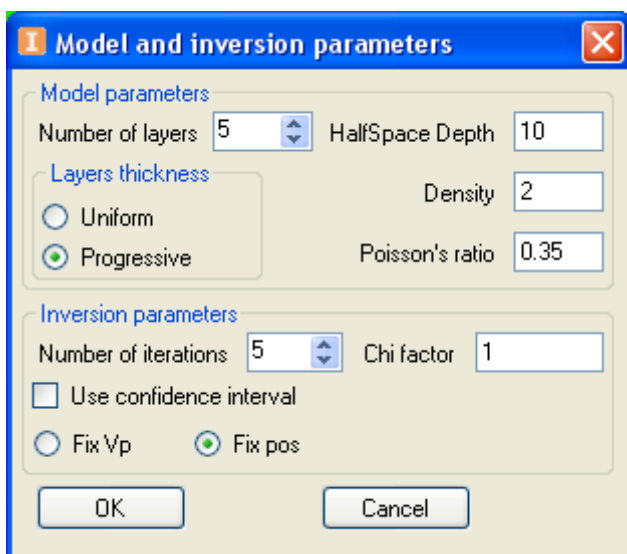
Нажмите кнопку Inversion - появится диалог выбора типа заполнения начальной модели.



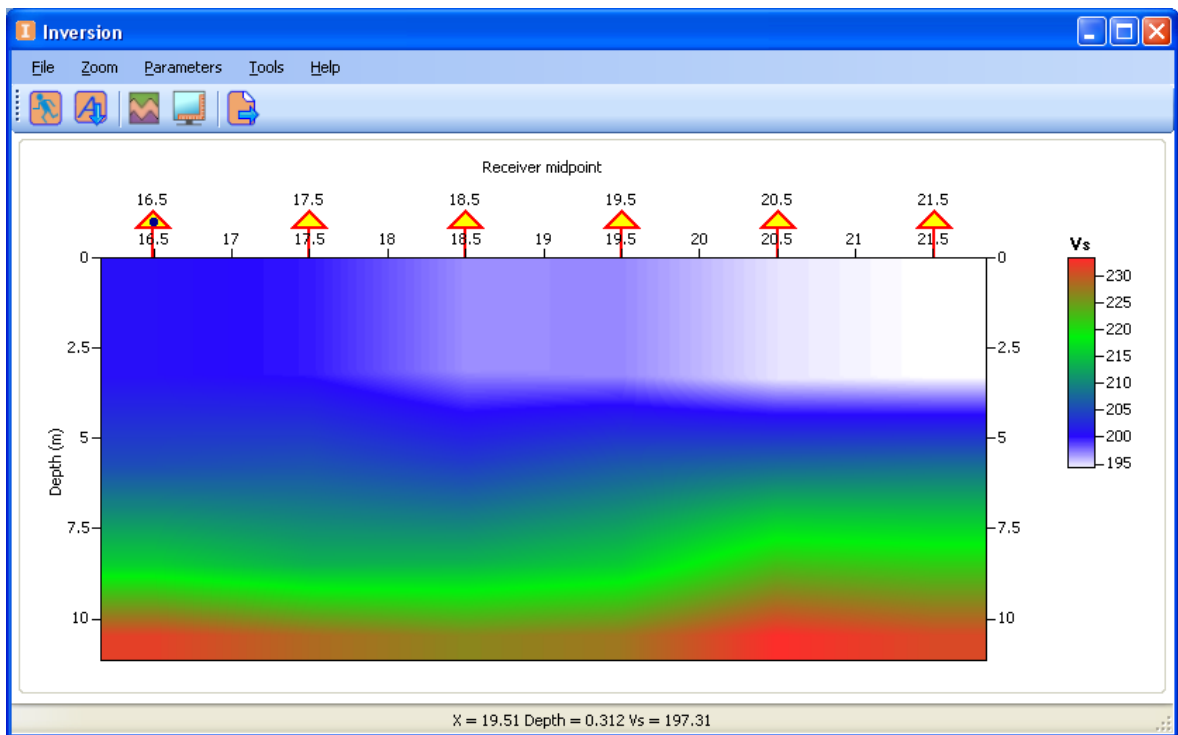
Выберем автоматическое заполнение, нажав кнопку «Да». В результате появится окно задания параметров начальной модели.

Выбор параметров начальной модели:

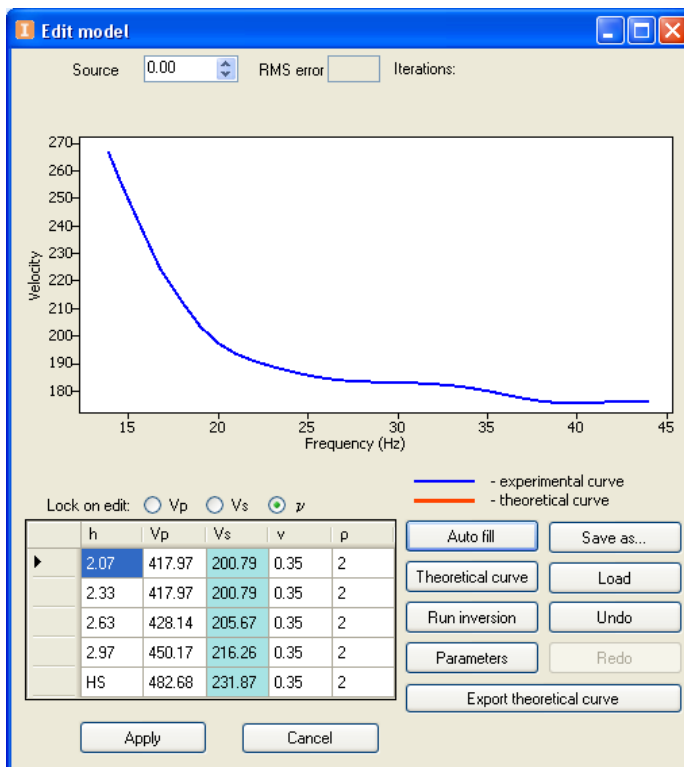
1. Глубина до полупространства. Приблизительную оценку глубины до полупространства следует выбирать исходя из максимальной длины волны, делённой пополам. Определим максимальную длину волны из дисперсионного изображения, относящегося к первому ПВ. Крайняя точка имеет частоту ~ 13 Гц и фазовую скорость ~ 265 м/с, что соответствует длине волны примерно равной 20 м. Зададим глубину до полупространства, равной половине этой длине волны, т.е. 10 м.
2. Установим количество слоёв равное 5, с возрастающими с глубиной толщинами слоёв. Number of layers -5, Layer thickness – Progressive.
3. Остальные параметры оставим по умолчанию, изменив только величину, которая будет фиксирована при инверсии: **Fix Pos** – фиксируется коэффициент Пуассона, при изменяющемся V_p (Подробное описание параметров и приведено в Руководстве пользователя).



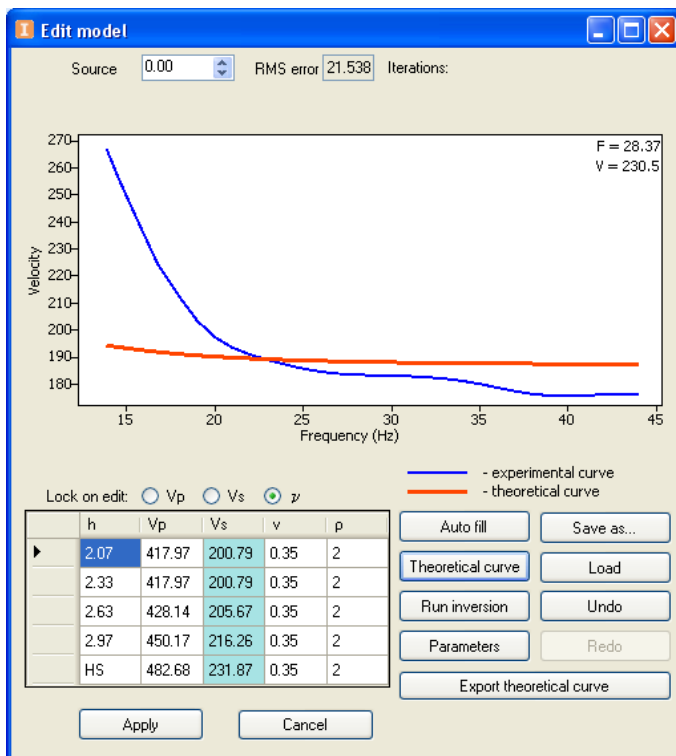
Нажмите ОК, появится окно с изображением автоматически полученной начальной модели:



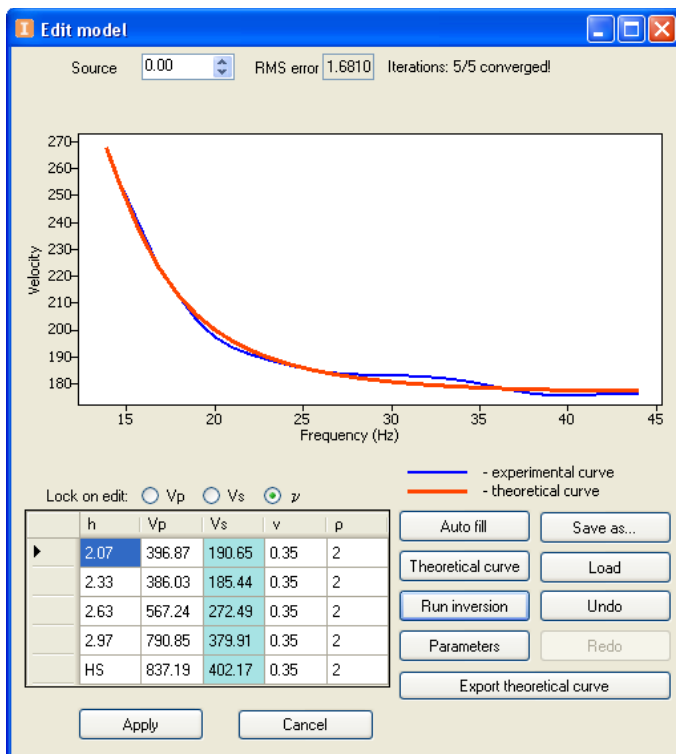
Треугольниками обозначены срединные точки расстановки, к которым привязаны кривые, а соответственно и профили поперечных скоростей. Перейдите в режим подбора кривых, щелкнув двойным щелчком левой кнопкой мыши на треугольнике первого ПВ. Появится окно подбора кривых. По умолчанию, синим цветом в нем отображается пропикированная кривая, относящаяся к ПВ, указанному в поле Source:



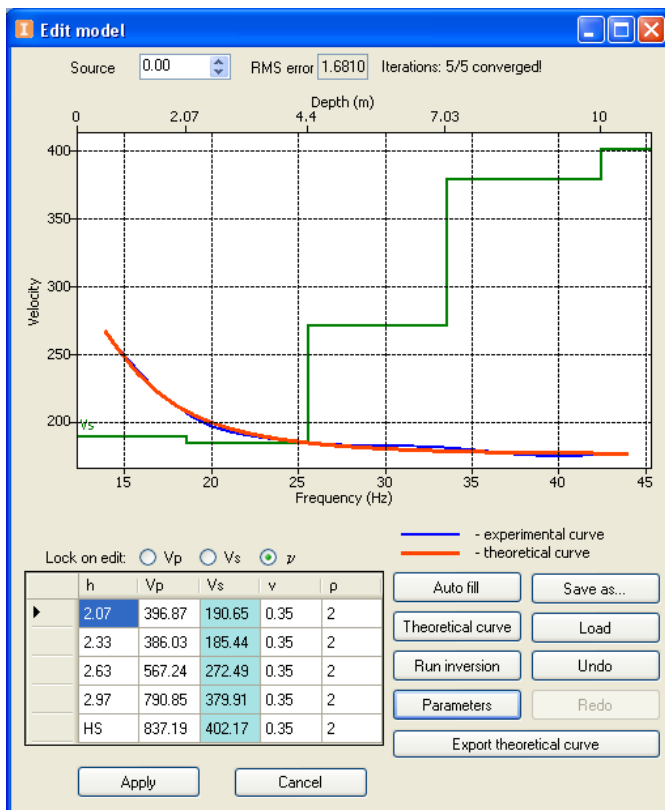
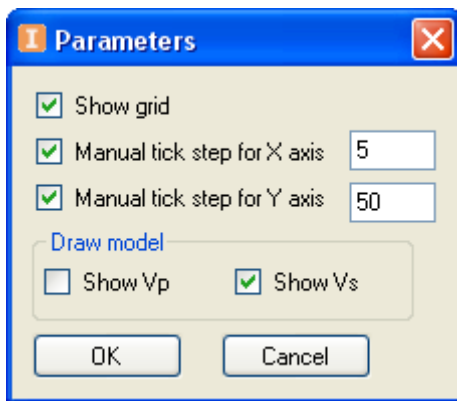
В нижней части окна отображается начальная модель среды, исходя из тех параметров, которые были заданы нами ранее. Чтобы отобразить теоретическую кривую для данной модели нажмите **Theoretical Curve** – она изображается красным цветом:



Запустите процесс подбора теоретической кривой, нажав кнопку **Run Inversion**. На каждой итерации обновляется текущая модель среды и соответствующая ей кривая. Процесс останавливается при достижении указанной среднеквадратической ошибки. Результат подбора кривой для данного ПВ:

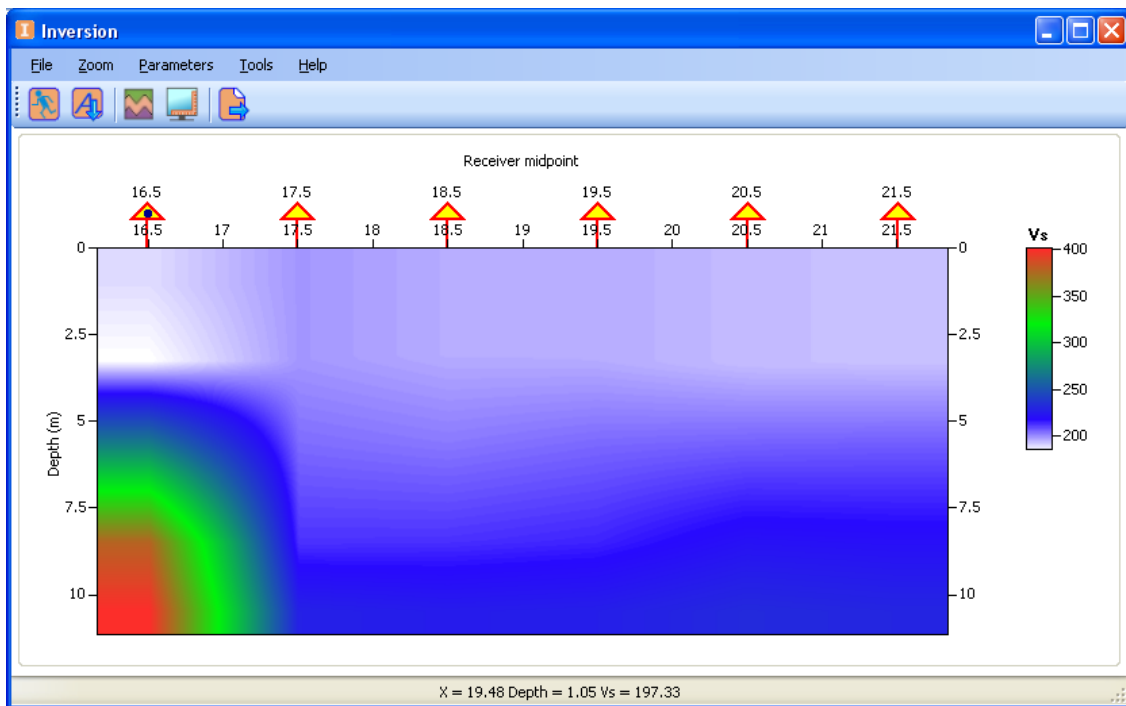


Для отображения профиля поперечных скоростей поверх дисперсионной кривой нажмите Parameters и установите галку "Show Vs". Также в данной вкладке могут быть установлены параметры сетки отображения:



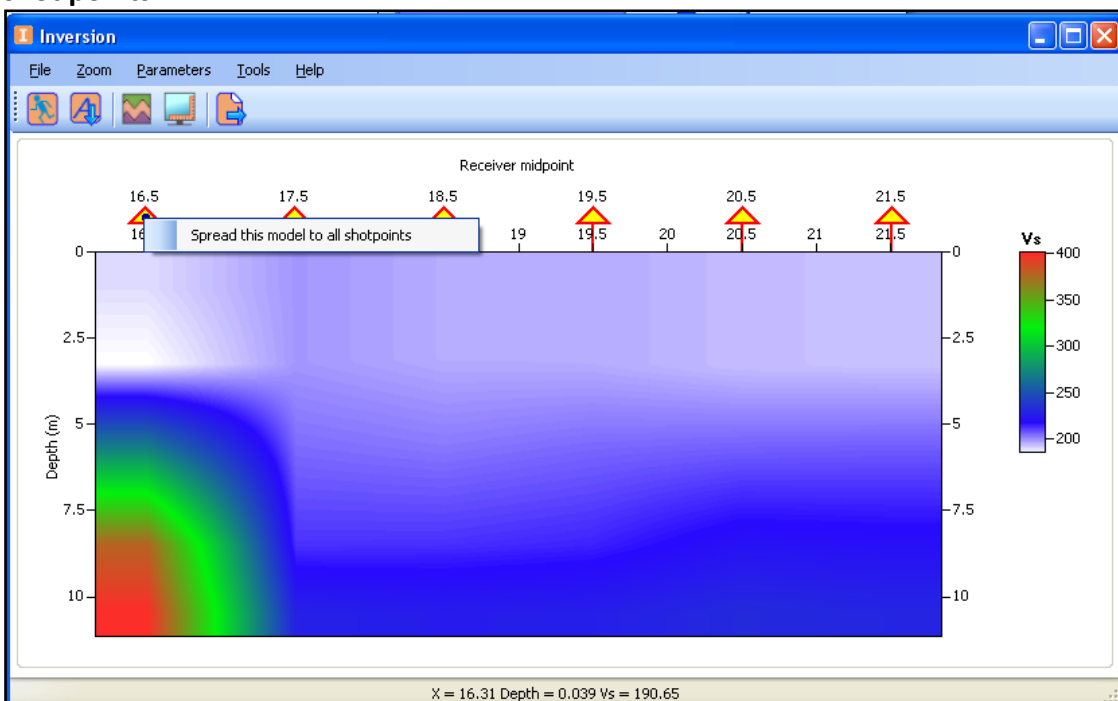
Опция подбора кривых **Edit model** предоставляет пользователю широкие возможности по изучению влияния различных параметров среды на изменение формы дисперсионной кривой.

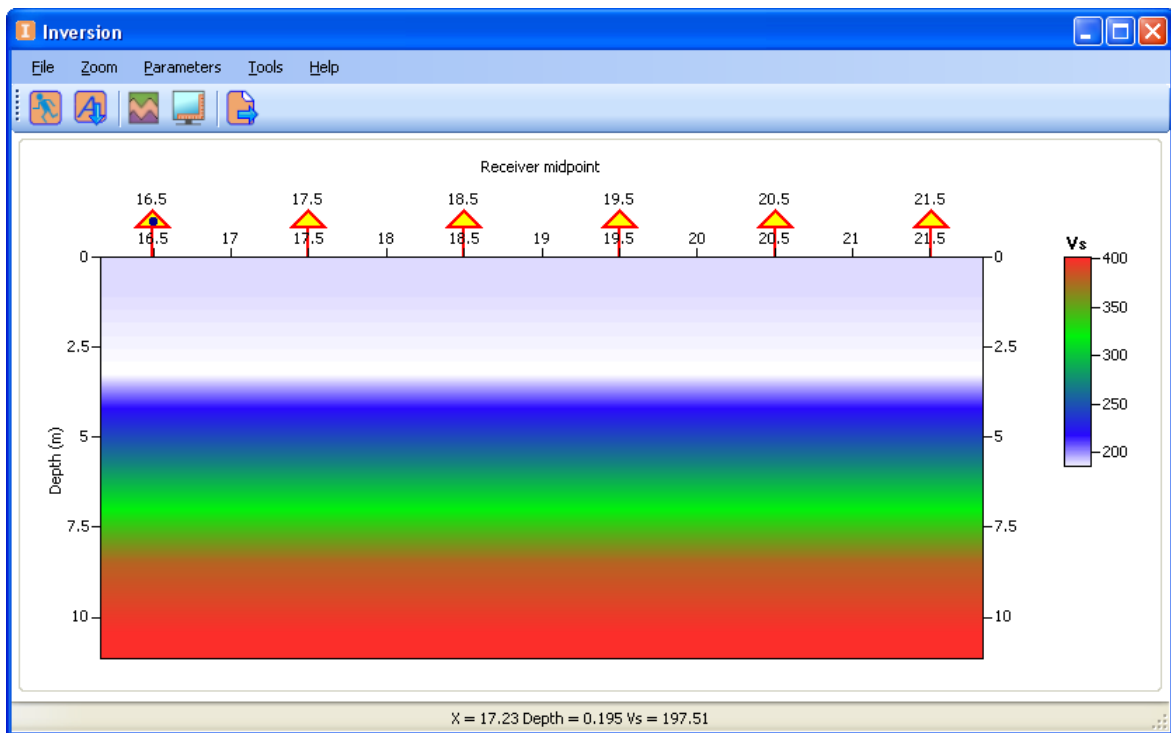
Нажмите кнопку Apply – текущая модель для ПВ 0 отобразится в окне итоговой модели **Inversion**:




Подбор кривых для остальных ПВ может быть осуществлен аналогичным путем.

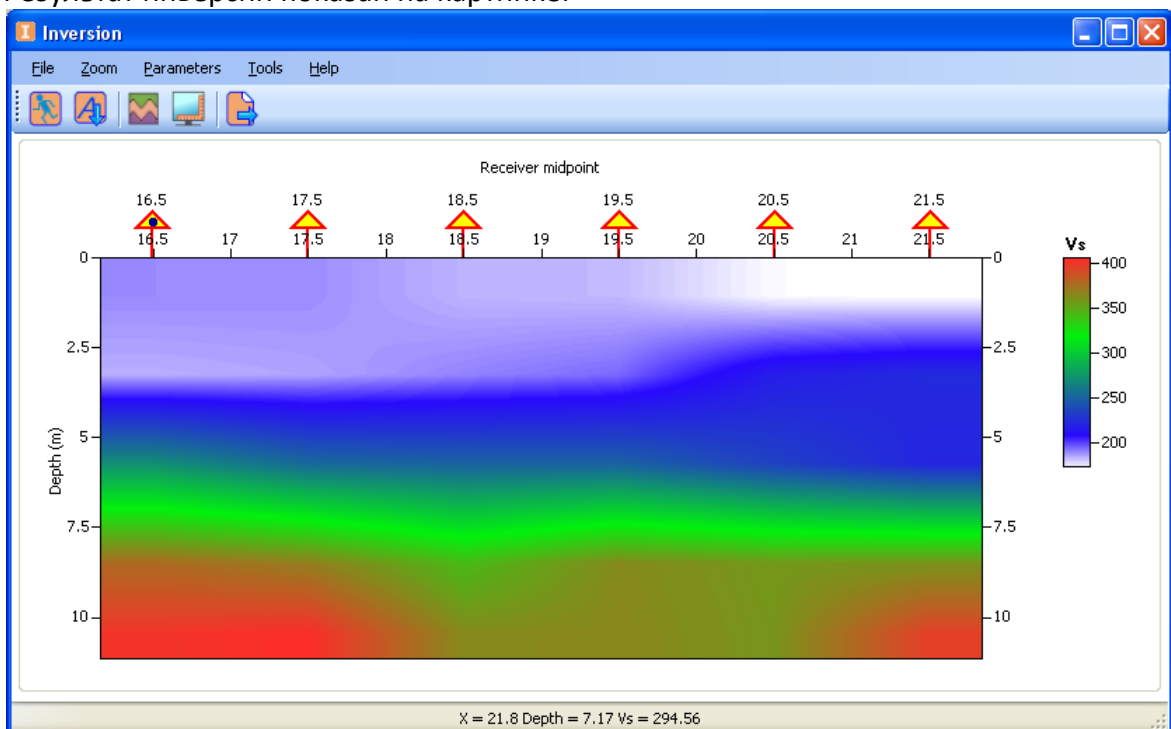
Поскольку процесс инверсии является неоднозначным и сильно зависит от начальной модели, поступим следующим образом – зададим в качестве начальной модели для остальных ПВ подобранную модель на нулевом ПВ. Для этого в окне **Inversion** нажмем правой кнопкой мыши на треугольнике этого ПВ и выберем опцию **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.