

# **XТomo-LM**

Система сейсмической томографии XGeo

**Версия 3.0**

*Руководство пользователя*

XGeo Ltd.  
Санкт-Петербург  
2014

XТомо-LM: Система сейсмической томографии XGeo. Версия 3.0. Руководство  
пользователя

© 2008 - 2014 XGeo Ltd.

Издатель: *XGeo Ltd.*

Автор: *Александр Винник*

# Содержание

	0
<b>Что нового в версии 3?</b>	<b>1</b>
<b>Введение</b>	<b>5</b>
1 Кинематическая интерпретация .....	5
2 XТомо-LM 3: Обзор .....	7
3 Волны .....	8
4 Входные данные .....	9
5 Представление модели .....	10
6 Разрешение .....	12
<b>Схема и среда обработки</b>	<b>14</b>
1 Схема обработки .....	14
2 Менеджер проектов .....	15
3 Создание проектов .....	16
4 Манипуляции с проектами .....	19
5 Дерево обработки .....	20
6 Менеджер волн .....	24
7 Спектр цветов скорости .....	26
8 Пакеты, архивы, XТомо-LM 2 .....	29
<b>Изображение модели</b>	<b>31</b>
1 Графические модули .....	31
2 Увеличение и выделение .....	34
3 Экспорт .....	36

<b>Редактирование модели</b>	<b>39</b>
1 Модуль редактирования .....	39
2 Изменение густоты решетки .....	40
3 Редактор кривых .....	42
4 Изменение геометрии решетки .....	45
5 Редактирование скорости .....	46
<b>Представление наблюдений</b>	<b>49</b>
1 Обзор .....	49
2 Просмотр системы наблюдений .....	50
3 Импорт системы наблюдений .....	54
4 Система наблюдений в М-проекте .....	56
5 Каталог лучей в М-проекте .....	59
<b>Решение прямой задачи</b>	<b>62</b>
1 Обзор .....	62
2 Модуль Forward Problem Solver .....	62
3 Лучевая картина .....	65
4 Выборки лучей. Создание и сохранение .....	69
5 Изучение невязок в I-проекте .....	71
6 Плотность лучевого покрытия .....	72
7 Подготовка к томографии .....	74
8 Экспорт .....	75
<b>Решение обратной задачи томографии</b>	<b>77</b>
1 Теория .....	77

---

2	Модуль Inverse Problem Solver .....	80
3	Просмотр решения .....	82
4	Завершение цикла интерпретации .....	83
<b>Построение сейсмических границ</b>		<b>85</b>
1	Введение .....	85
2	Подготовка годографов .....	87
3	Построение рефлектора .....	90
4	Построение рефрактора .....	94
5	Пример 1: Постоянная скорость .....	94
6	Пример 2: Градиентный слой (рефлектор) .....	98
7	Пример 3. Градиентный слой (рефрактор) .....	100
8	Заключительные замечания .....	103
<b>Вспомогательные инструменты</b>		<b>104</b>
1	SRT-утилиты .....	104
2	Статические поправки .....	107
<b>Приложения</b>		<b>109</b>
1	Экспорт из XТomo LM. Сводка. ....	109
2	Форматы основных ASCII файлов .....	110
3	Другие форматы .....	112

## Что нового в версии 3?

Со времени выхода первой версии программное обеспечение использовалось для обработки данных ГСЗ, МОГТ (изучение верхней части разреза), скважинного просвечивания, различных инженерно-геологических изысканий и даже для мониторинга состояния архитектурных памятников. Оригинальный способ представления модели и алгоритм трассировки лучей делает XTomo-LM 3 удобным, хорошо масштабируемым инструментом для самых разных задач. Версия 3 обеспечивает дальнейшую жизнь продукта в современной аппаратной и операционной среде (многоядерные процессоры и последние версии Windows) с полным использованием всех ее преимуществ.

Настоящий выпуск 3.0.2 представляет XTomo-LM 3 в полном объеме. Предварительный выпуск 3.0.1 был "экстренным" и имел целью как можно быстрее помочь пользователям версии 2, которые столкнулись с проблемами эксплуатации в среде Windows последних версий. Внешний дизайн продукта сохранен, как и базовая функциональность: поддержка проектов, редактирование модели, прямая задача, обратная задача томографии, построение сейсмических горизонтов. Но **реализация** базовых и сервисных функций является совершенно новой. Она обеспечивает достижение следующих целей:

- полная совместимость XTomo-LM с последними версиями Windows;
- новая архитектура хранения данных;
- повышение производительности;
- внедрение новых алгоритмов решения базовых задач;
- более быстрый и комфортный интерфейс пользователя.

Ниже перечислены только главные новшества.

### 1. Новая архитектура хранения данных

Именно архитектура хранения данных, в частности, использование устаревших продуктов сторонних производителей, явилась причиной низкой производительности решения прямой задачи и упомянутых выше проблем эксплуатации. В версии 3 эти недостатки полностью устранены благодаря применению новой концепции хранения данных. Модернизация позволила существенно увеличить эффективность системы как при тяжелых вычислениях, так и при визуализации больших объемов данных.

### 2. Эффективность решения прямой задачи

В версии 3 трассировка лучей организована по-новому и частично распараллелена. Новый алгоритм учитывает возможности современных процессоров Intel и является масштабируемым: эффективность зависит от числа логических процессоров в системе. В следующем примере лучи проходящей, отраженной и преломленной волн трассировались на решетке размером 896 x 160 (143360 ячеек). Схема наблюдений включала 101 источник и 201 приемник, суммарное число лучей по всем волнам – 60903. В таблице показано чистое время счета T (мин:сек) в зависимости от числа задействованных логических процессоров N.

N	1	2	4	8
T	38:27	32:30	17:11	9:01

Вычисления проводились на рабочей станции с процессором Intel Core i7 3.4 GHz с 8 логическими процес-

сорами. Использование центрального процессора большую часть времени составляло 95–100%. Значение  $T$  при  $N = 1$  приблизительно соответствуют времени счета в версии 2.

### 3. Редактирование модели

Набор инструментов редактирования модели в прежних версиях был далек от оптимального, а его применение зачастую неудобным. В новой версии функциональность редактора жестко связана с концепцией представления модели в XТomo-LM. Редактор модели позволяет изменять (1) густоту решетки, (2) величину скорости и (3) геометрию модели. Первые 2 задачи решаются, в основном, так же как в версии 2. Добавлена функция явного сглаживания скорости. Геометрия модели определяется формой  $h$ -линий. Поэтому в редактор модели версии 3 встроен редактор кривых, позволяющий очень быстро придать линии нужную форму. Перестройка решетки, вызванная изменением формы  $h$ -линии, происходит мгновенно и без участия пользователя. То же относится к импорту  $h$ -линии (горизонта) из файла. По сравнению с версией 2, изменение геометрии стало простой и быстрой операцией. В редакторе версии 3 поддерживается стек отката операций. Кнопки "Вперед" и "Назад" позволяют отменять/возвращать последние изменения.

### 3. Новые алгоритмы обращения годографов отраженных и головных волн

Хотя построение сейсмических горизонтов было включено в версию 2, предлагавшиеся средства носили явно предварительный характер, переключая на пользователя задачу выбора кривой из так называемого множества допустимых точек. Версия 3 использует новые высокопроизводительные алгоритмы кинематической миграции, требующие от пользователя минимального объема априорной информации и числа параметров. Результатом выполнения алгоритма является кривая, представляющая горизонт, точки которой лежат в узлах решетки. Результат можно сразу просмотреть на изображении модели для оценки адекватности. Точность построения обусловлена густотой решетки и, конечно, зависит от условий регулярности годографов и распределения скорости. Подобно решению прямой задачи, эти алгоритмы распараллелены по логическим процессорам системы, обеспечивая тем меньшее время счета, чем больше доступно логических процессоров в системе. Построение сейсмических границ стало, наряду с прямой задачей и томографическим обращением, важнейшим инструментом XТomo-LM. В документацию включены разделы с примерами применения новых алгоритмов, наглядно иллюстрирующие возможности использования криволинейной решетки для представления слоистой модели.

### 4. Томография на выборках лучей

Для качественного обращения важно, чтобы невязки наблюдаемых и расчетных времен пробега по лучам лежали в достаточно узком диапазоне (принцип равноточности измерений). Хотя формально на вход обратной задачи можно подать любую смесь лучей, невозможно эффективно минимизировать большие и маленькие невязки одновременно: ведь минимизируется их среднеквадратическое значение.

Предыдущие версии XТomo-LM не имели средств отбора лучей для обращения: в ход шли все трассированные лучи. В версии 3 пользователь может получить выборку лучей из решения прямой задачи по сложному критерию (набор источников и приемников, тип волны и удаления, величина невязок) и подать ее на вход обратной задачи. Решив один раз затратную по времени прямую задачу, можно провести целый ряд обращений, уточняющих скорость в разных областях модели. Скажем, для скорости в первом слое можно использовать лучи отраженной волны с малыми удалениями, а для глубинной части разреза – лучи проходящей волны с большими удалениями и лучи головной волны (или закритические отражения) от глубокого горизонта. При этом оценки точности построения модели будут разными для разных интервалов разреза.

### 5. Моделирование обменных волн

В версии 3 существенно расширены возможности моделирования обменных волн. Во-первых, для обменных волн зарезервирован широкий диапазон кодов без нарушения прежней системы кодирования волн.

Во-вторых, при моделировании отраженных волн в слоистой среде можно задавать произвольные наборы коэффициентов конверсии на границах раздела для падающей и отраженной волны.

## 6. Анализ решения прямой задачи

Важные изменения внесены в модуль просмотра решения прямой задачи. Расчетные годографы можно теперь рассматривать в отдельном от модели окне. По требованию, это окно можно пристыковать к изображению модели с лучами. Окна можно синхронизировать при увеличении изображения. Специальные меры приняты для изображения очень большого (десятки тысяч) числа лучей, в частности процесс рисовки можно прерывать. Можно просматривать карты плотности лучевого покрытия и экспортировать их в графический файл. Сделана более удобная операция замораживания скорости в подобласти модели, необходимая для последовательного изучения разреза. В частности, можно фиксировать скорость в ячейках с определенной плотностью лучевого покрытия.

## 7. Анализ SRT-файлов

Входные данные для проектов обращения (I-проектов) поставляются в виде файлов формата SRT. В предыдущих версиях проверка SRT-файлов не была исчерпывающей, что приводило к трудно обнаруживаемым ошибкам при обработке. Кроме того, проверка проводилась до первой ошибки. В версии 3 контролю SRT-файлов уделено специальное внимание. При импорте данных SRT проводится полный анализ данных с выявлением всех ошибок, которые перечисляются в файле-протоколе. Предварительная обработка SRT-утилитами теперь начинается с новой утилиты SRT Checker, осуществляющей полный анализ файла и, по требованию, сохраняющей данные во внутреннем формате для последующей работы. Для профильных наблюдений предназначена новая утилита просмотра SRT-файлов в виде годографов и их редактирования. SRT-файл, поставляемый внешним программным обеспечением, может быть разбит на части, отвечающие специальным задачам, путем оперирования с изображением системы годографов исходного SRT-файла.

## 8. Пакеты и архивы

В практике использования XTomo-LM нередки случаи, когда обработка одних и тех же материалов ведется на двух площадках, например, на борту судна и в центре обработки. Для оперативного обмена данными в такой ситуации не было предусмотрено специальных средств. В версии 3 они появились. Если выделить узел в Дереве обработки Менеджера проектов и подать необходимую команду, программа упакует ветвь дерева, заканчивающуюся выделенным узлом и всю инфраструктуру проекта (волны, спектр скорости и пр.) в файл, называемый пакетом. Он может быть размещен на сайте или переслан по электронной почте. Другая команда программы превращает пакет в новый проект, в котором Дерево обработки состоит из ветви, содержащейся в пакете.

Помимо этого, Менеджер проектов может упаковать в архивный файл весь проект и распаковать его при необходимости. Пользователь может управлять степенью сжатия архивного файла.

## 9. Разное

Среди прочих изменений отметим следующие:

Менеджер проектов (МП). При создании проекта можно в качестве начальной модели взять модель из любого корневого узла Деревя обработки любого проекта версии 3. МП управляет теперь спектром цветов для изображения скорости в графических модулях. Спектр входит в инфраструктуру проекта. В Дереве обработки поддерживаются виртуальные f-узлы для хранения выборок лучей, поступающих на вход решения обратной задачи томографии.

Графические модули в новой версии отображают вертикальный и горизонтальный профили скорости во время перемещения курсора над моделью. Введены быстрые клавиши выделения рядов и колонок решетки. Добавлена возможность прокрутки изображения путем перетаскивания.



Редактор систем наблюдений в М-проектах. Добавлены команды создания расстановки вдоль h-линии или вертикали.

Модуль просмотра решения обратной задачи томографии. Выводится карта относительных поправок к начальной скорости. Она может быть экспортирована в графический файл.

### **10. XТомо-LM версий 2 и 3**

Поскольку структура и форматы хранения данных изменились, XТомо-LM 3 не может открыть проект, созданный в версии 2. Однако исходные данные любого шага обработки, т.е. содержимое узлов Model и Observations из проекта версии 2, могут быть конвертированы с образованием нового проекта версии 3. Эта операция запускается одной из команд Менеджера проектов.

В отличие от предыдущих обновлений, XТомо-LM 3 может быть установлена на рабочей станции наряду с XТомо-LM 2.x, а не вместо нее.

Версия 2 XТомо-LM могла использоваться с пакетом подготовки данных (Data Preparation Unit, DPU). Система DPU 2 обеспечивает считывание времен вступлений с полевых сейсмограмм и создание входных SRT-файлов для XТомо-LM 2. В этом своем качестве DPU 2 может использоваться и с XТомо-LM 3. Однако, вывод решения прямой задачи на сейсмограммы ОПВ, реализуемый совместно XТомо-LM 2 и DPU 2, для версии 3 временно не доступен – до выпуска DPU 3.

## Введение

### 1 Кинематическая интерпретация

Кинематическая интерпретация принадлежит к классу задач интерпретации данных физического эксперимента. В нашем случае эксперимент – это полевые сейсмические наблюдения, данные – времена пробега сейсмических волн, считанные с сейсмических записей, интерпретация – определение двумерной модели среды, класс допустимых моделей – слоистые среды с непересекающимися границами раздела слоев. Модель описывается распределением скорости  $V(x, z)$  и уравнениями горизонтов. Универсальное средство решения задача такого рода – моделирование, в нашем случае – кинематическое моделирование распространения волн. Задача моделирования или *прямая кинематическая задача* заключается в трассировке лучей волн разных типов для заданной модели среды и заданной системы наблюдений и расчете времен пробега по лучам. Метод кинематической интерпретации – подбор модели среды по критерию минимальности невязок между наблюдаемыми и расчетными временами пробега волн. Основным инструментом подбора – программные средства моделирования. Наряду с термином "кинематическая интерпретация", используются термины *решение обратной кинематической задачи* или *обращение времен пробега сейсмических волн*.

Пусть  $\mathbf{T}^*$  – вектор наблюдаемых времен размерности  $n$  (векторы и матрицы обозначаем жирным шрифтом). Пусть  $\mathbf{F}: V \rightarrow \mathbf{T}$  – оператор решения прямой задачи. Он сопоставляет распределению скорости  $V$  вектор расчетных времен  $\mathbf{T}$ . В символьном виде задача интерпретации может быть записана так:

$$(1) \quad \|\mathbf{T}^* - \mathbf{F}(V)\|_n \rightarrow \min.$$

Здесь через  $\|\mathbf{X}\|_k$  обозначена норма (длина) вектора размерности  $k$ . Понятно, что в такой постановке задача вряд ли имеет смысл. Наблюдаемые времена дают слишком мало информации для оценки распределения скорости. Однако, в распоряжении интерпретатора всегда имеется значительный объем геологических и геофизических данных. Эти пусть и не формализованные сведения позволяют сформировать гипотезу о *начальном приближении* к искомой модели. Обозначим ее через  $V_0$ . Теперь можно переформулировать задачу (1) в более реалистичной форме, а именно как задачу об уточнении модели: требуется определить поправки  $\Delta V$  как решение задачи минимизации

$$(2) \quad \|\mathbf{T}^* - \mathbf{F}(V_0 + \Delta V)\|_n \rightarrow \min.$$

Задачи (1) и (2) различаются принципиально. В (1) относительно  $V$  нет никакой информации; в (2) значительная, может быть большая, часть этой информации содержится в  $V_0$ .

Обозначим через  $\Delta \mathbf{T}$  вектор невязок во временах между наблюдаемыми временами и расчетными временами в прямой задаче для модели  $V_0$ :  $\Delta \mathbf{T} = \mathbf{T}^* - \mathbf{F}(V_0)$ . Можно, изучив невязки  $\Delta \mathbf{T}$  и используя профессиональную интуицию, изменить модель "вручную" и, решив прямую задачу, снова изучить невязки. Если они уменьшились, можно продолжать изменение модели в том же направлении, реализуя *ручной подбор* модели. Мы говорим о ручном подборе в том смысле, что не существует машины, которая приняла бы данные на вводе и выдала ответ на выходе. В соотношениях (1) и (2) ради простоты не указана зависимость  $\mathbf{F}$

от сейсмических горизонтов.

Если речь идет только об определении скорости  $V(x, z)$ , можно решить задачу (2) более эффективно, если предположить, что поправки  $\Delta V$  достаточно малы. Поскольку речь идет о цифровых моделях,  $V$  задается в конечном числе точек, т.е. является вектором, как и  $\Delta V$ . Используя стандартный подход, принятый в дифференциальном исчислении, заменим оператор прямой задачи в (2) его линейным приближением:

$$F(V_0 + \Delta V) \approx F(V_0) + D \cdot \Delta V.$$

Здесь  $D$  – матрица, составленная из частных производных компонент вектора  $F$ , вычисленных при значении аргумента  $V_0$ . Задача (2) примет вид

$$(3) \quad |\Delta T - D \cdot \Delta V|_n \rightarrow \min.$$

Задача (3) относительно поправок  $\Delta V$  принадлежит к изученному классу математических задач. Это линейная задача метода наименьших квадратов. И хотя она все еще не является *корректной*, известны методы ее *регуляризации* (все термины будут в своем месте разъяснены). Подход к интерпретации, основанный на редукции общей задачи (2) к задаче (3) составляет содержание *сейсмической томографии на временах пробега*, а задача (3) называется *обратной задачей томографии*. Термин *томография на первых вступлениях* является частным случаем, связанным со специальным приемом отождествления событий на сейсмических записях.

Независимо от того, используется ли ручной подбор модели или применяется томография, интерпретация предполагает последовательные приближения к результату. Это многошаговый процесс. В случае ручного подбора это очевидно. Главное предположение томографии о малости поправок  $\Delta V$  позволяет лишь незначительно изменить начальное приближение  $V_0$ , но уточненное значение может быть принято за новое начальное приближение, и процедура может повторяться, пока невязки времен не станут достаточно малыми.

Сейсмическая томография (как она реализована в XТомо-LM) не привязана к какому-либо специальному типу волн. Наблюдения любых волн – непрерывно-рефрагированных, отраженных, головных – могут быть использованы для решения задачи определения скоростного разреза.

XТомо-LM 3 включает еще один класс обратных кинематических задач: восстановление сейсмических горизонтов по годографам отраженных и головных волн при известном распределении скорости в покрывающей среде. Решение таких задач основано на эволюционном уравнении распространения сейсмических волн. Из соответствующей теории используется только кинематическая составляющая: уравнение эйконала  $T(x, z)$  для времени пробега волны. Согласно теории, если известен след поля времен  $T(x, z)$  на кривой  $L$  в момент времени  $t_0$ , то можно восстановить значения  $T(x, z)$  при  $t > t_0$  и  $t < t_0$  в рамках лучевого приближения. Обратное (т.е. для  $t < t_0$ ) продолжение поля времен с линии наблюдения называется *миграцией*. Сопоставляя время пробега падающей волны с мигрированным полем времен отраженной (головной) волны, можно найти конфигурацию отражателя (рефрактора).

Соединение сейсмической томографии как способа определения скоростного разреза с обращением годографов как способа построения сейсмических горизонтов дает метод решения сложной задачи интерпретации слоистой модели. XТомо-LM 3 представляет собой реализацию этого метода, предоставляя среду обработки данных и набор программных инструментов.

## 2 XТомо-LM 3: Обзор

### Базовые инструменты интерпретации

XТомо-LM 3 включает следующие основные программные средства [кинематической интерпретации](#):

1. Средства создания и редактирования модели среды.
2. Средства для определения, импорта и редактирования системы наблюдений, т.е. положения и нумерации источников и приемников.
3. Средства кинематического моделирования или решения прямой кинематической задачи. Для данной (слоистой) модели среды и схемы наблюдений рассчитывается (и изображается) лучевая картина и вычисляются времена пробега указанных волн по лучам.
4. Средства решения обратной задачи сейсмической томографии.
5. Средства построения горизонтов по системам годографов отраженных и головных волн.

### Среда обработки

И обработка полевых материалов, и моделирование никогда не сводятся к разовому применению той или иной программы. Это всегда процесс, в котором подбираются параметры и условия, сравниваются различные варианты. Поэтому значительная часть программных средств XТомо-LM 3 связана с созданием и поддержкой *среды обработки*. В это понятие входят организация данных, средства управления ими и дисциплина работы. С задачей моделирования или материалами полевых наблюдений связывается *проект*, в рамках которого разворачивается работа пользователя. В XТомо-LM 3 различаются проекты моделирования (М-проекты, Modeling projects) и проекты обращения (I-проекты, Inversion projects). Граф обработки для проектов реализуется и управляется *Менеджером проектов* – головной программой системы, представляющей видимую пользователю часть среды обработки. Менеджер проектов отображает список проектов, а для открытого проекта – состояние обработки и иерархию данных. Он позволяет запускать *модули* и *утилиты* – приложения для решения базовых и сервисных задач. Менеджер проектов поддерживает элементы инфраструктуры проекта: пути к файлам и папкам специального назначения, список волн, цветовой спектр скорости. К сервисным задачам относятся средства просмотра, импорта и экспорта данных. Хотя ряд ключевых модулей системы являются графическими, система не включает средств презентационной графики, но обеспечивает возможность экспорта описаний модели, горизонтов, лучей и других объектов в *ASCII файлы* для импорта в графические пакеты, например, Surfer™ компании Golden Software®.

### О документации и терминологии

Всюду в документе, начиная с этого места, "XТомо-LM" означает "XТомо-LM 3". Номер версии указывается, только если этого требует контекст. Англоязычный пользовательский интерфейс использует, по возможности, общепринятую в англоязычной литературе терминологию, но специфика в применении терминов, безусловно, есть. Она связана с использованием понятий в программных интерфейсах. В русскоязычной документации указатель расширен за счет английских терминов в пользовательском интерфейсе программ. Документация в форматах CHM и PDF вызывается из меню *Пуск/Все программы XТомо-LM 3*. Документация в формате CHM используется также в системе контекстной помощи (клавиша F1, кнопки и меню Help).

## 3 Волны

### Терминология

Использование слоистой модели предполагает различие сейсмических волн разного происхождения. В XТото-LM используются следующие термины:

- проходящая (непрерывно-рефрагированная, ныряющая, diving, transient);
- отраженная (reflection);
- головная (преломленная, head, refraction).

Под **головной волной** понимается волна, распространяющаяся вдоль горизонта малой кривизны, который разделяет слои с предельными значениями скоростей  $V_1$  (сверху) и  $V_2$  (снизу), удовлетворяющими условию  $V_1 < V_2$ . Подразумеваемая физическая модель – волновод: волна сжатия распространяется вдоль тонкого слоя под горизонтом и порождает исходящие вверх лучи. В документации и пользовательском интерфейсе используется преимущественно термин "головная волна", а не "преломленная волна", чтобы подчеркнуть выбранную модель.

В словосочетании "томография на первых вступлениях" термин *первые вступления* (также *первая волна*) относится к событиям на сейсмической записи. В XТото-LM первые вступления понимаются как аппроксимация вступлений проходящей волны. Они могут принадлежать как собственно проходящей волне (вблизи источника), так и головным волнам (на больших удалениях).

Если не оговорено противное, волны предполагаются монотипными. В задачах моделирования рассматриваются также *обменные* (converted) волны. Факт конверсии после прохождения границы Н раздела слоев или при отражении от нее понимается формально, а именно, как изменение скорости распространения с  $V(x,z)$  на  $C_H \cdot V(x, z)$ , где  $V$  – скорость в данной модели,  $C_H$  – коэффициент конверсии, зависящий только от горизонта.

### Кодировка

Волне сопоставляется числовой код (идентификатор, ID) следующим образом:

ID волны = 0, если волна проходящая;

ID волны = <ID горизонта><Тип волны>, если волна отраженная или головная.

ID горизонта – число от 1 до 99, например порядковый номер горизонта в модели, считая сверху вниз (подробнее [здесь](#)). Тип волны кодируется одной или тремя цифрами:

0 – отраженная;

1, 100 - 199 – отраженные обменные;

2 головная;

3, 300 - 399 – головные обменные.

Кодировку нельзя назвать естественной, но это связано с обеспечением обратной совместимости версии 3 по данным с предыдущими версиями XТото-LM. В пользовательском интерфейсе код волны выводится с дефисом между ID горизонта и типом:

1-0, 1-101, 3-301, 3-302, 4-2.

Во входных файлах SRT тип волны пишется без дефиса:

10, 1101, 3301, 3302, 42.

Коды монотипных отраженных и головных волн можно дополнять двумя нулями, тогда все коды будут

иметь типы из трех цифр:

1000, 1101, 3301, 3302, 4200.

Наряду с кодом волне сопоставляется набор атрибутов рисовки, в частности, уникальный цвет. Атрибуты используются при изображении лучей и годографов в графических модулях. Подробнее об этом сказано в разделе [Менеджер волн](#).

## 4 Входные данные

Входными данными для проектов XTomo-LM являются начальная модель и описание системы наблюдений. Начальная модель задается при создании проекта. Об этом речь идет в соответствующем [разделе](#) документа. Здесь речь идет о второй компоненте входных данных.

### SRT-данные для I-проектов

SRT-данные – это информация о схеме полевых наблюдений и временах пробега волн. SRT-данные поставляются в текстовом файле, точнее ASCII-файле (цифры, буквы латинского алфавита, знаки препинания) формата [SRT](#).

Строка файла формата SRT состоит из трех блоков: **S**, **R**, **T**. Блоки **S** и **R** – это тройки чисел ID, X, Z, описывающие источник (Source) и приемник (Receiver). ID – это номер или идентификатор, X и Z – координаты. Блок **T** содержит пару чисел T и W: время пробега от источника **S** к приемнику **R** волны с кодом W.

SRT-данные требуют подготовки. Во-первых, может потребоваться преобразование координат из системы, принятой в проекте полевых работ к двумерной декартовой системе (X, Z), используемой в XTomo-LM: ось X горизонтальна, направлена слева направо, ось Z вертикальна, направлена вверх. Во-вторых, на сейсмических записях должна быть проведена идентификация сейсмических волн, и с них должны быть считаны времена вступлений. Наконец, должен быть сформирован файл формата SRT. Для многих типов наблюдений, особенно массовых наблюдений, подготовка SRT-данных является самостоятельной проблемой, и не может быть выполнена вручную. Компания XGeo предоставляет как отдельный продукт Систему подготовки данных (Data Preparation Unit, DPU), которая решает все перечисленные выше задачи.

SRT-файлы импортируются специальным модулем XTomo-LM в ходе работы в рамках проекта. Кроме того, имеется несколько утилит для предварительного анализа SRT-данных. Они описаны в последней главе документа.

### SR-данные для M-проектов

В проекте моделирования система наблюдений может быть создана в графическом модуле Spread Editor. Но при необходимости ее можно импортировать из ASCII-файлов форматов [SR](#) или [S и R](#). Строка SR-файла, перечисляющего пары источник-приемник, состоит из двух блоков **S** и **R** (см. выше). Файлы с расширениями .S и .R содержат списки источников и приемников соответственно. Строка этих файлов состоит из одного блока.

## 5 Представление модели

Традиционно математической моделью слоистой среды является вектор-функция скорости

$$\mathbf{V}(x, z) = (V_1(x, z), V_2(x, z), \dots, V_m(x, z)),$$

где компоненты вектора соответствуют слоям модели.  $V_k(x, z)$  считаются гладкими функциями, заданными в областях плоскости  $(X, Z)$ , соответствующих слоям. Слои описываются набором кривых – границ раздела. Дискретизация модели использует прямоугольную сетку для слоев и свою сетку для каждой границы раздела. Трассировка лучей осуществляется путем численного решения системы лучевых дифференциальных уравнений (Cerveny V, Psencik I. *2D Seismic Ray Package. Pague, 1981*).

### Концепция модели в XТomo-LM

В XТomo-LM модель описывается функцией скорости  $V(x, z)$ , заданной в узлах криволинейной решетки (сетки), образованной набором вертикалей и семейством непересекающихся простых кривых (см. ниже). Ячейки сетки являются трапециями, параллельные стороны которой вертикальны. Левое и верхнее ребро ей принадлежат, точка их пересечения называется *вершиной* ячейки. Правое и нижнее ребро не принадлежит ячейке. Функция скорости продолжается с вершины ячейки внутрь ячейки как константа. После продолжения  $V$  становится кусочно-постоянной функцией. Алгоритм трассировки лучей не требует непрерывности  $V$ , тем более гладкости. Он использует не дифференциальную форму законов распространения (в лучевом приближении), а принципы Гюйгенса и Ферма в интегральной форме. Такое представление модели можно получить и путем дискретизации непрерывной модели, но это только частный случай.

В геологии и геофизике распределение скорости в среде обычно описывается в геометрических терминах (слой, горизонт, структура). Для описания геометрии модели криволинейная решетка подходит лучше прямоугольной. Для моделирования волны, отраженной от криволинейного горизонта, лучше всего использовать решетку, в которой горизонт является одной из линий сетки, а скоростная аномалия в покрывающей среде ограничена парой кривых и парой вертикалей (рис. 1). В отличие от традиционного подхода, ни горизонт, ни аномалия скорости не потребуют специального описания при трассировке лучей. Разумеется, в задачах, где геометрический фактор не имеет значения, достаточно использовать прямоугольную сетку.

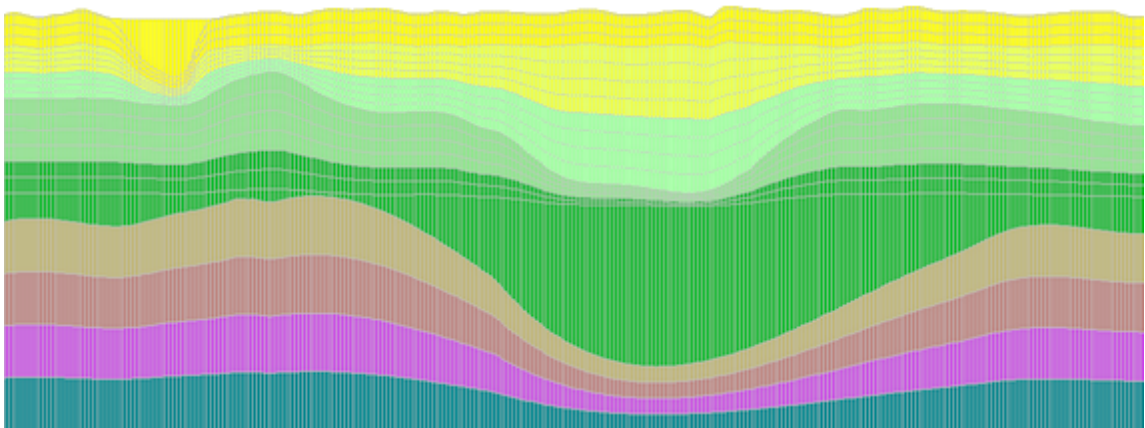


Рис. 1. Эта слоистая модель точно представляется криволинейной решеткой рассматриваемого класса.

### Подробности

Используется правая декартова система координат на плоскости с горизонтальной осью  $Ox$  и осью  $Oz$ , направленной вертикально вверх. Модель занимает область  $D$ , представляющую собой 4х-угольник, ограниченный вертикалями  $x = L$ ,  $x = R$ , снизу – горизонталью  $z = B$ , сверху – простой кривой, которую будем называть *верхней границей модели* (model top line). Кривая является простой, если пересекается любой вертикалью не более, чем в одной точке (а значит, на интервале  $[L, R]$  задается функцией  $z = f(x)$ ). Область  $D$  может располагаться произвольно по отношению к началу координат.

При создании проекта пользователь определяет начальную модель. При этом наименьший прямоугольник, ее вмещающий, не может быть изменен в ходе обработки. Границы этого прямоугольника являются константами проекта. Верхнюю границу модели можно ввести или изменить только в самом начале обработки.

Решетка или сетка (grid, mesh) образована набором вертикалей (или  $v$ -линий,  $v$ -lines) и набором простых кривых ( $h$ -линий,  $h$ -lines), не имеющих общих точек.  $H$ -линия обязательно пересекает левую и правую границу модели и, значит, не может "войти" или "выйти" из области  $D$  через верхнюю или нижнюю границы. Точки пересечения линий решетки называются *узлами* (nodes) решетки. Решетка образует вертикальные *колонки* (columns) и *ряды* (rows) ячеек. Вертикали и колонки нумеруются слева направо,  $h$ -линии и ряды – сверху вниз. Для пользователя ячейка определяется двойным индексом (номер колонки, номер ряда). Узел определяется положением ячейки, для которой он является вершиной. Узлы на нижней и правой границе не интерпретируются. В подписи к рис. 2 названы и другие подмножества решетки, упоминаемые в пользовательском интерфейсе.

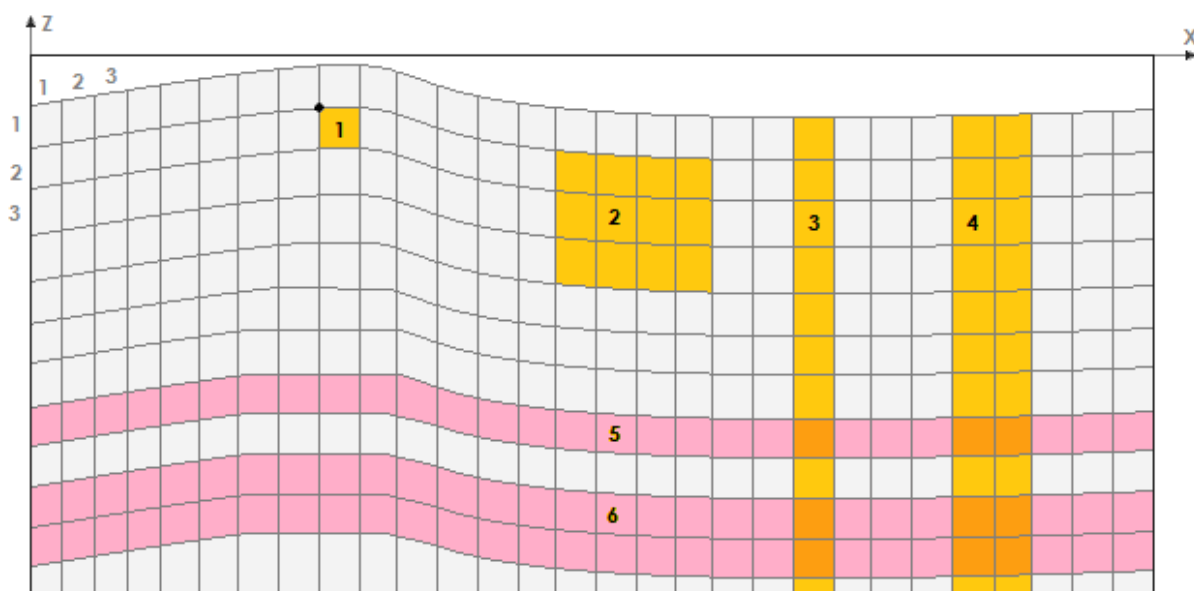


Рис. 2. Стандартные подобласти решетки.

1 – ячейка (cell) и ее вершина (vertex); 2 – подрешетка (subgrid); 3 – колонка (column);  
4 – вертикальная полоса (vertical strip); 5 – ряд (row); 6 – горизонтальная полоса (horizontal strip).  
Слева вверху показано направление нумерации рядов и колонок.

Ограничения на  $h$ -линии являются достаточно сильными. Их можно описать термином *субгоризонтальность*.  $H$ -линиями нельзя описать очень сложные структуры, но подходящим распределением скорости на решетке с  $h$ -линиями их можно хорошо аппроксимировать.  $H$ -линии нумеруются сверху вниз. Номер  $h$ -линии совпадает с номером ряда, для которого она является кровлей.



Густота решетки выбирается из физических соображений. В первую очередь, следует помнить, что распространение волн описывается в лучевом приближении, и, значит, изменения параметров модели на расстояниях меньших двух длин волн не имеют физического смысла. Значит, следует принимать во внимание спектр волны, "освещающей" данный интервал разреза. По этой причине решетка в верхней части разреза должна быть гуще, чем на больших глубинах. По причинам, связанным с корректностью машинных вычислений, следует избегать вытянутых ячеек. Отношение проекций ячейки на координатные оси должно лежать в интервале от 0.1 до 10, но лучше, чтобы оно было ближе к 1.

Скорость  $V(x, z)$  задается в узлах решетки. Множество троек  $\{(x_k, z_k, V_k)\}$  определяет и узлы (и тем самым геометрию), и значения скорости. Модель без сейсмических границ полностью описывается функцией  $V(x, z)$ .

### Перестройка решетки

Изменение геометрии решетки связано с изменением формы  $h$ -линий. Это одна из важнейших операций редактирования модели. Изменение геометрии вызывается, например, внедрением в ортогональную решетку известного или построенного средствами XТomo-LM сейсмического горизонта. В соответствии с общей концепцией горизонт должен являться одной из  $h$ -линий. Изменение формы  $h$ -линии или внедрение новой  $h$ -линии обязательно влечет изменение формы соседних  $h$ -линий решетки в соответствии с алгоритмом, который "зашит" в программном обеспечении. Пользователь не может в него вмешаться, но может указать область модели (горизонтальную полосу) вне пределов которой решетка остается неизменной. Эта полоса называется *областью возмущения решетки* (Grid Perturbation Area). На рисунке в [этом пункте](#) показана перестройка решетки (remeshing).

### Сейсмические горизонты. Описание слоистой модели

Предполагается, что сейсмический горизонт в модели совпадает с одной из  $h$ -линий. Определить горизонт – значит указать номер  $h$ -линии  $H$ , ID горизонта и указать хотя бы одну волну  $W$ , которая на нем образовалась. В качестве ID можно взять порядковый номер горизонта в модели, считая сверху. Но лучше брать в качестве ID числа, идущие не подряд, например, 10, 20, 30, но возрастающие вместе с глубиной залегания горизонта – это обязательное условие. Тогда не будет проблем с вставкой новых горизонтов. Тройка чисел (ID,  $H$ ,  $W$ ) полностью определяет горизонт.

Модель является слоистой, если определен хотя бы один горизонт, отличный от верхней границы модели. Таким образом, слоистая модель  $\mathbf{M}$  описывается, во-первых, распределением скорости  $V(x, z)$  и, во-вторых, *списком горизонтов*  $\mathbf{H}$ , т.е. набором троек (ID,  $H$ ,  $W$ ). Коротко:  $\mathbf{M} = (V, \mathbf{H})$ .

## 6 Разрешение

### Машинные вычисления

При вычислениях XТomo-LM оперирует с действительными числами. Точность представления таких чисел в компьютере ограничена. XТomo-LM работает с 4-байтными двоичными числами с плавающей точкой, что соответствует десятичным числам с 7 значащими цифрами. Главная проблема вычислений с конечной точностью – накопление ошибок округления, которое может привести к непредсказуемым результатам при использовании некоторых алгоритмов.

Чтобы избежать этого, следует, прежде всего, наложить ограничение на допустимую близость объектов. При вычислении расстояния между объектами их координаты вычитаются. Если объекты близки, происходит потеря значащих цифр, а это означает потерю точности (увеличение относительной погрешности значения). Оставшиеся младшие разряды могут быть испорчены округлением. Объекты становятся нераз-

личимыми, вычислительная задача теряет смысл. Объектами, о которых идет речь, могут быть линии решетки, источники, приемники, лучевые траектории и т.д.

В XTomo-LM нижняя граница близости объектов (линий сетки, источников, приемников и пр.) определяется парой чисел

$$C_x = 10^{-5} \cdot W, \quad C_z = 10^{-5} \cdot H,$$

где  $W$  и  $H$  – ширина и высота прямоугольника модели. Это означает, что диапазон измерений в задаче для XTomo-LM не должен быть более 5 порядков. Пара  $(C_x, C_z)$  называется *вычислительным разрешением*. На практике пользователь никогда не должен подходить вплотную к вычислительному разрешению. Он должен оперировать *физическим разрешением*  $(R_x, R_z)$ , которое устанавливается при создании проектов, основываясь на масштабах сейсмического эксперимента, на физических и геологических соображениях. Физическое разрешение является одной из констант проекта XTomo-LM. Понятно, что  $R_x > C_x$ ,  $R_z > C_z$ . На всех стадиях обработки система контролирует близость объектов в данном контексте и информирует пользователя об *ошибке разрешения* (resolution error), если она возникает. В пользовательском интерфейсе термин "разрешение" (resolution) означает "физическое разрешение".  $R_x$  называется  $x$ -разрешением,  $R_z$  –  $z$ -разрешением.

Выбор единиц измерения – дело пользователя. Они не фигурируют в данных и пользовательском интерфейсе XTomo-LM.

### Форматы

Основными переменными в кинематическом анализе являются координаты  $(x, z)$ , время  $(T)$  и скорость  $(V)$ . Их значения должны выводиться на экран, для чего требуется задать форматы вывода. Они являются свойствами проекта. Формат задается как маска числа с фиксированной точкой, например, 9999.999. Имеется прямая связь между форматом и разрешением. Если  $R$  – разрешение для переменной  $Y$ , и  $|Y_1 - Y_2| > R$ , то формат должен порождать разные символьные строки для  $Y_1$  и  $Y_2$ . Обратно, если формат задан правильно, то значение разрешения, выведенное в этом формате, содержит хотя бы одну значащую цифру.

# Схема и среда обработки

## 1 Схема обработки

### Циклы обработки

Пусть  $M_0 = (V_0, H_0)$  – начальная модель. Такое описание модели введено [здесь](#),  $H_0$  – список горизонтов (возможно, пустой). Обработку в проекте обращения можно описать как последовательность циклов, причем каждый цикл является комбинацией следующих базовых задач:

1. Редактирование модели:  $M_0 \rightarrow M_1$ .
2. Импорт или создание системы наблюдений либо копирование из предыдущего цикла.
3. Построение сейсмического горизонта (отражающего или преломляющего).
4. Решение прямой задачи для модели  $M_1$  (трассировка лучей) и данной системы наблюдений; анализ решения.
5. Решение обратной задачи томографии – только для I-проекта; результатом является уточненное (refined) распределение скорости  $V_{1r}$  и соответствующая модель  $M_{1r}$ .

Разумные комбинации задач такие: 1-2-3; 1-2-4; 1-2-4-5. Один цикл можно считать *итерацией* в ходе последовательного приближения к результатам интерпретации. Процесс включает несколько циклов по следующим причинам:

- Уточнение скорости  $V_1 \rightarrow V_{1r}$  посредством решения обратной задачи томографии теоретически есть уточнение "в малом", при малых вариациях скорости, в том смысле, как это понимается в дифференциальном исчислении. Поэтому ожидать, что даже при неплохом начальном приближении  $V_1$  результат будет получен за один цикл, не приходится.
- Слоистая среда изучается последовательно по слоям сверху вниз, причем на каждой итерации скорость в предыдущем слое "замораживается". В этом случае сам подход предусматривает последовательные приближения, помимо "технической" необходимости повторения циклов для изучения каждого слоя.
- На практике каждый шаг требует нескольких вариантов по разным причинам, но, главным образом, из-за необходимости оптимального подбора параметров программ.

Завершение процесса интерпретации всегда происходит после шага 4, после вычисления статистик невязок между расчетными и наблюдаемыми временами. Комбинация 1-2-4 используется при [ручном подборе модели](#).

В проекте моделирования цикл использует комбинацию 1-2-4 со следующей модификацией шага 2:

- 2m. Создание, или импорт системы наблюдений, или ее копирование из предыдущих циклов.

Число циклов зависит от цели моделирования. Обычно M-проект включает решение прямой задачи для набора близких моделей и нескольких систем наблюдений.

### Поток данных

Каждый шаг цикла требует входных данных из предыдущих шагов и порождает выходные данные. Эти данные, часто очень большого объема, хранятся на диске в виде поддерева папок файловой системы. Все данные, относящиеся к данному проекту, хранятся в *папке проекта* (Project Folder), а проекты XTomo-LM изолированы от остальной файловой системы в *рабочей папке* (Working Folder). Еще две папки резервируются для каждого проекта: папка для импорта/экспорта и папка для пакетов/архивов. Первая является папкой по умолчанию для всех файлов, импортируемых в XTomo-LM и экспортируемых из нее. Вторая папка предназначена для пакетов и архивов – сжатых файлов данных.

XTomo-LM предназначена для использования на рабочей станции, а не в сетевой среде. *Данные должны находиться на той же станции, на которой запускаются приложения.*

## 2 Менеджер проектов

Менеджер проектов – головная программа XTomo-LM. Она запускается, когда пользователь щелкает по ярлыку XTomo-LM на рабочем столе. Назначение программы – представлять пользователю среду обработки и управлять ею. В этом разделе дается общий обзор приложения.

Главное окно программы частично показано на рис. 1.

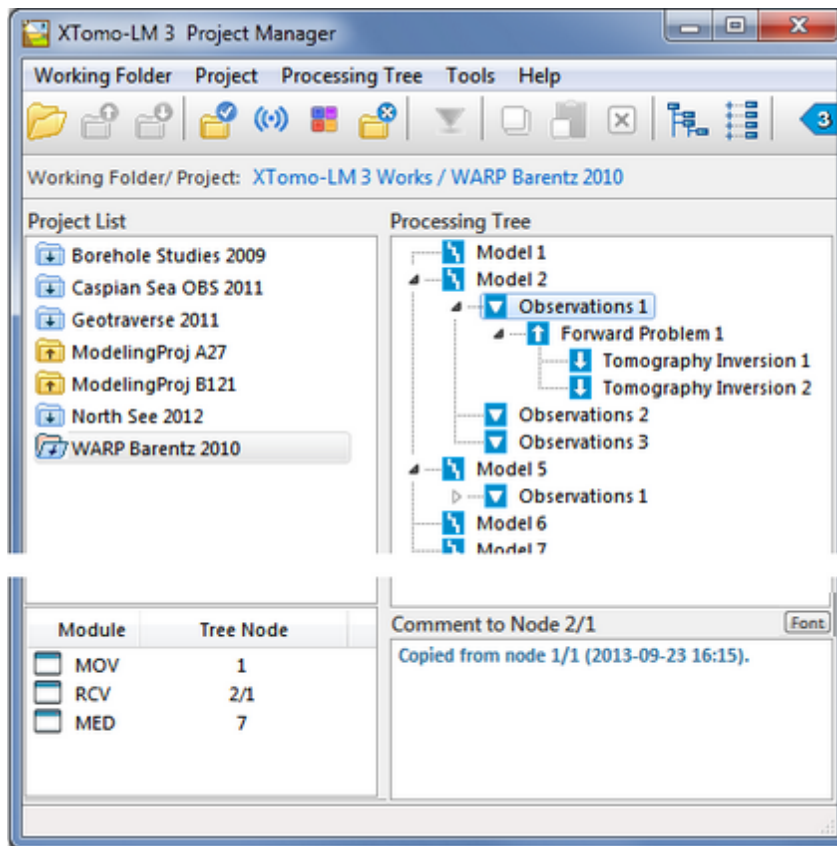


Рис. 1. Главное окно Менеджера проектов.

Оно имеет четыре панели: *Project List* (список проектов) – слева; *Active Module List* (список активных модулей) – слева внизу; *Processing Tree* (Дерево обработки открытого проекта) – справа; *Comment* (примечания к выделенному узлу дерева) – справа внизу. Помимо команд главного меню и инструментальной панели, все панели, кроме примечаний, имеют контекстные меню. Особое значение имеет меню Дерева. Оно содержит команды запуска *исполняющих модулей* для решения основных задач обработки. Помимо модулей, Менеджер проектов может запускать *утилиты*. Так названы сервисные программы, не связанные непосредственно с циклом обработки. Они запускаются из подменю *Tools* главного меню. Функциональность Менеджера проектов рассматривается в разделах данной главы. В списке проектов I- и M-проекты обозначены разными значками.

## 3 Создание проектов

### Служебные папки

Перед запуском Менеджера проектов рекомендуется создать (в Проводнике Windows) две служебные папки: одну – для хранения импортируемых и экспортируемых файлов, скажем, XТomo-LM Import-Export, другую – для папок с архивами и пакетами (XТomo-LM Archives). Файлы импорта/экспорта данного проекта удобно хранить папке с именем проекта, созданной внутри XТomo-LM Import-Export. Так же можно поступить со второй папкой, но не обязательно, поскольку архивы и пакеты имеют специальные имена, в которые входит имя проекта.

### Рабочие и архивные папки

Проекты создаются в рабочих папках XТomo-LM. Рабочих папок может быть несколько. Создаются они командой *Working Folders|Common Folders* главного меню Менеджере проектов. Команда вызывает диалог с двумя выпадающими списками. В первом хранятся однажды созданные рабочие папки, во втором – архивные папки. Пользователь может либо выбрать папку из списка, либо выбрать/создать ее в браузере локальных папок. В рабочей папке должны храниться только папки проектов, иначе Менеджер будет выводить предупреждение при каждом запуске. Выбор рабочей папки возможен только при закрытых проектах. *Архивная папка создается вне рабочей папки.*

### Начало

Проекты обращения и моделирования создаются разными командами меню *Working Folders*, но действия пользователя в обоих случаях почти одинаковы. Команды создания проектов доступны, если все проекты закрыты. По команде *Working Folders|New I-Project* выводится диалог *Inversion Project Properties* (Свойства проекта обращения). Первая вкладка показана на рис. 1а.

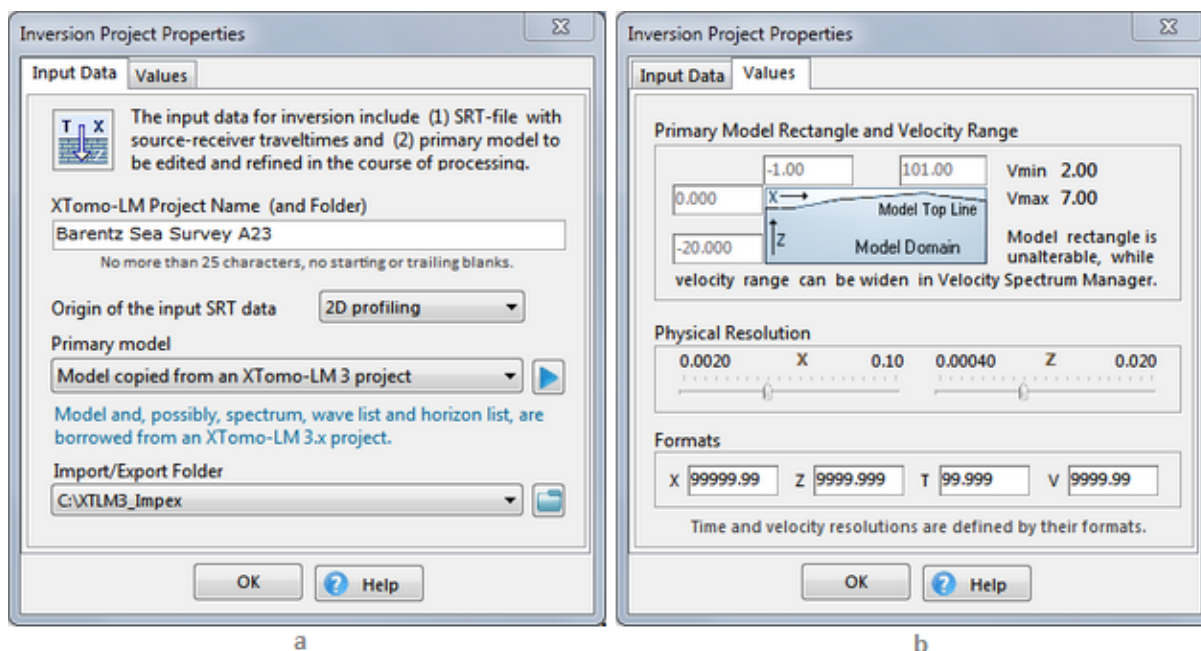


Рис. 1. Создание I-проекта. а) вкладка 1; б) вкладка 2.

Вводим имя проекта в поле *Project Name*. Имя проекта является одновременно именем папки, поэтому нельзя использовать символы из известного списка. Кроме того, имя содержит не более 25 символов и не может иметь ведущих и концевых пробелов. Других ограничений нет. После ввода имени становятся доступны остальные поля. Выбираем тип наблюдений (*Origin of the Input SRT Data*): профилирование (2D Profiling) или другие (например, скважинные). В случае M-проекта это поле отсутствует. В нижнем поле определяем или выбираем из списка папку импорта/экспорта. *Папки импорта/экспорта создаются вне рабочих папок*. Далее определяем начальную модель (*Primary Model*).

### Классы начальных моделей

Термин "начальная" понимается здесь в том смысле, что выбранная модель служит основой для последующего редактирования. Кроме того, она определяет некоторые константы проекта, например, границы модели. В выпадающем списке *Primary model* перечислены способы создания модели:

1. *Simple model* – простая модель: ортогональная решетка; скорость задается в угловых ячейках и интерполируется линейно на остальные ячейки.
2. *Model defined by a set velocity columns* – модель, определяемая набором скоростных колонок. Задается ортогональная решетка, скорость импортируется из файла формата **VC**.
3. *Model defined by a set of h-lines* – модель, определяемая каркасом h-линий. Задается прямоугольник модели, набор равноотстоящих вертикалей, скорость в вершинах прямоугольника. Затем из файла формата **MG** импортируется набор кривых – h-линий решетки.
4. *Model imported from VFT file* – модель импортируется из файла формата **VFT**, полностью определяющего модель.
5. *Model copied from an XTomo-LM 3 project* – модель копируется из указанного узла Model существующего проекта XTomo-LM 3.

### Начальная модель: создание

После выбора способа щелкните по кнопке справа от списка. Во всех случаях, кроме случая 4, появляется диалог, в котором либо прописаны действия пользователя, либо они понятны без объяснений. В случае 4

следует просто выбрать VFT файл. При выборе способа 1 диалог выглядит, как показано на рис. 2.

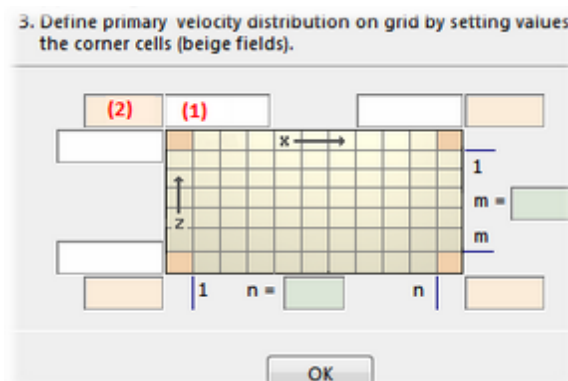


Рис. 2. Определение простой модели в качестве начальной.

После вызова поле (1) находится в фокусе. Введите в него абсциссу левой вертикали решетки  $X_{min}$ . Нажимая клавишу Tab, последовательно введите значения  $X_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$ . После этого Tab перемещает каретку в поле m (число горизонталей решетки, без учета граничных), затем – в поле n (число внутренних вертикалей), затем – в поле (2). В это поле вводится скорость в левой верхней ячейке. Она появляется в остальных трех полях скорости. С помощью клавиши Tab отредактируйте эти поля, если нужно. После этого щелкните по кнопке ОК. Границы решетки не могут быть изменены в ходе обработки, прочие значения можно изменить.

В диалогах 2 и 3 действуем аналогично. Набор скоростных колонок  $\{x_k, V_k(z), k = 1, 2, \dots, N\}$  – часто используемый способ задания скорости. Функция  $V_k$  задается в точках  $z_1, z_2, \dots, z_N$ , которые могут быть своими для каждой колонки. Текстовый файл формата VC предназначен для хранения набора скоростных колонок. Файл формата MG хранит набор кривых.

В диалоге 5 выбираем папку проекта, а затем – узел модели из выпадающего списка. По желанию, можно скопировать такие элементы инфраструктуры выбранного проекта, как Список волн, Цветовой спектр скорости, Список горизонтов.

### Разрешение и форматы

На второй вкладке диалога *Inversion Project Properties* определяются x- и z-разрешения и форматы вывода данных. При первом открытии вкладки они имеют значения по умолчанию (рис. 1b). Разрешения регулируются ползунками.левой границей является величина, близкая к вычислительному разрешению. При выборе разрешения следует учитывать будущее редактирование, в частности увеличение числа вертикалей и h-линий. Форматы X и Z связаны с их разрешениями, поэтому при перемещении ползунков они могут измениться. Поля форматов можно редактировать и непосредственно.

### Завершение. Просмотр свойств проекта

Определение разрешений и форматов завершает процедуру создания проекта. После щелчка по кнопке ОК Менеджер проектов создает папку проекта, Дерево обработки с узлом "Model 1" и всю инфраструктуру проекта. Список волн и Спектр цветов скорости, если они не были скопированы в диалоге 5, создаются со свойствами по умолчанию. Узел "Model 1" содержит начальную модель. Имя проекта появляется в Списке проектов.

Диалог *Inversion Project Properties* может быть вызван для любого открытого проекта командой *Project/Properties* главного меню или кнопкой инструментальной панели. При этом изменять можно только сле-

дующие свойства:

- папка импорта/экспорта;
- разрешения – только уменьшать;
- форматы, кроме V, – не нарушая их соответствия разрешениям.

Поскольку разрешение можно только уменьшать, правая граница линейки ползунков будет равна значению разрешения при предшествующей корректировке. Формат V можно изменить, но в другом месте: в Менеджере спектра скорости.

## 4 Манипуляции с проектами

Команды для работы с проектами находятся в меню *Working Folder* и *Project*, а также в контекстном меню списка проектов. В меню *Working Folder* собраны команды, добавляющие проекты в текущую рабочую папку. Меню *Project* относится к открытому в данный момент проекту. Меню списка проектов работает с проектом, выделенным в Списке. Команды меню перечислены в таблицах 1–3.

Таблица 1. Команды меню *Working Folder*. Добавление проектов в рабочую папку

Команда	Действие
<i>Common folders</i>	Вызывает диалог для определения/выбора рабочих и архивных папок. <a href="#">Подробнее.</a>
<i>New M-Project</i> <i>New I-Project</i>	Вызывает диалоги создания M- и I-проектов. <a href="#">Подробнее.</a>
<i>Add Project from Network Location</i>	Вызывает диалог для добавления в текущую рабочую папку проекта, расположенного в другой рабочей папке (в т.ч. на другой станции локальной сети) с возможностью изменения имени.
<i>Add Project from Package or Archive</i>	Вызывает диалог, позволяющий выбрать пакет или архив в архивной папке и создать из него проект в текущей рабочей папке.
<i>Add Project from Version 2 Project</i>	Вызывает диалог, позволяющий выбрать ветвь Model-Observation в проекте версии 2.x и на их основе создать проект в текущей рабочей папке. <a href="#">Подробнее.</a>

Таблица 2. Команды меню *Project*. Действия с открытым проектом

Команда	Действие
<i>Properties</i>	Вызывает диалог со свойствами открытого проекта. <a href="#">Подробнее.</a>
<i>Velocity Color Spectrum</i>	Вызывает Менеджер спектра скорости. Команда доступна всегда. <a href="#">Подробнее.</a>
<i>Wave Manager</i>	Вызывает Менеджер волн. Команда доступна всегда. <a href="#">Подробнее.</a>
<i>Close Project</i>	Закрывает открытый проект.



Таблица 3. Команды контекстного меню Списка проектов

Команды меню относятся к закрытому проекту, выделенному в данный момент в Списке.

Команда	Действие
<i>Open</i>	Открывает выделенный в списке проект (двойной щелчок).
<i>Rename</i>	Позволяет изменить имя проекта.
<i>Clone</i>	Создает копию проекта в текущей рабочей папке с указанным именем.
<i>Copy to</i>	Вызывает диалог для копирования проекта в указанную папку (в т.ч. на другой станции локальной сети) с возможностью изменения имени.
<i>Delete</i>	Удаляет проект из списка, а его папку со всеми данными – с диска.
<i>Archive</i>	Вызывает диалог для создания архивного файла проекта. <a href="#">Подробнее.</a>

## 5 Дерево обработки

Дерево обработки выводится на правой панели Менеджера проектов в момент открытия проекта. Структура дерева определяется шагами цикла обработки и иерархией данных обработки. Фрагмент Дерева показан на рис. 1.

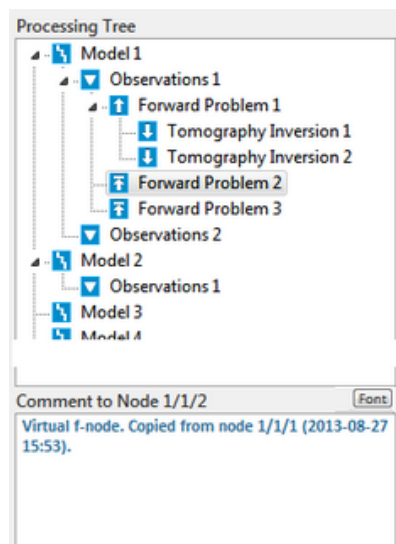


Рис. 1. Фрагмент Дерева обработки проекта.

Названия узлов Дерева фиксированы, а нумерация ведется программой. При удалении узлов нумерация не меняется. В документации и пользовательском интерфейсе используются следующие сокращения для узлов разных уровней:

- Model – m-узел
- Observations – o-узел;
- Forward Problem – f-узел;
- Tomography Inversion – i-узел.

Дерево обработки является также отображением дерева папок файловой системы. В этих папках хранятся данные, ассоциированные с узлом. Выражения "папка узла", "хранится в узле" используются далее без пояснений.

### Примечания

Небольшое поле примечаний или комментариев *Comment to Node <код узла>* относится к выделенному в Дереве узлу. Код узла состоит из номеров родителей и самого узла через слэш в направлении от корня Дерева, например "Node 2/1/1". Длина текста примечания ограничена 300 символами. Иногда при создании узла Менеджер проектов сам записывает в поле строку о происхождении узла (рис. 1). Но в дальнейшем это обязанность пользователя. При многовариантной обработке комментарии необходимы. Чтобы введенный в поле текст сохранился, следует либо нажать клавиши Enter или Tab, либо щелкнуть левой

кнопкой мыши по Дереву или списку проектов в любом месте. Клавиша Esc отменяет сделанные пользователем изменения. Кнопка *Font* позволяет изменить шрифт примечаний.

### Рост дерева

В двух случаях новые узлы создаются Менеджером проектов: при запуске модуля решения прямой задачи и при запуске модуля томографического обращения. В первом случае создается f-узел, во втором – i-узел. В остальных случаях новые узлы создаются по инициативе пользователя командами меню *Processing Tree* или кнопками инструментальной панели. Доступность команд и действие, которое они производят, зависят от того, какой узел выделен в дереве. Сводка команд дана в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Команды копирования и создания узлов Дерева обработки

Команда	Выделен. узел	Действие
<i>Copy Node</i>	m	Создает копию корневого узла Model.
	o	Начинает двухшаговую операцию копирования o-узла по типу копировать-вставить.
	f	Создает новый виртуальный f-узел (близнец), содержащий выборку лучей. Команда доступна, если исходный узел сам не является виртуальным. <a href="#">Подробнее</a> .
	i	Создает корневой узел Model, помещая в него уточненную модель из i-узла.
<i>Create O-node</i> <i>Paste O-node</i>	m	Вставляет новый ( <i>Create</i> ) или скопированный ( <i>Paste</i> ) узел Observation в дерево как дочерний узел m-узла.
	o, f, i	Не доступна.

Создание нового m-узла посредством копирования существующих m- или i-узлов открывает новый [цикла обработки](#).

Таблица 2. Другие команды меню *Processing Tree*

Команда	Действие
<i>Delete Node</i>	Удаляет выделенный узел дерева вместе с дочерними узлами. Данные узлов удаляются с диска.
<i>Expand Tree</i>	Разворачивает все узлы Дерева обработки. Чтобы развернуть выделенный узел, используйте команду <i>Expand Node</i> в контекстном меню Дерева.
<i>Collapse Tree</i>	Сворачивает Дерево до корневых узлов.
<i>Rebuild Tree</i>	Восстанавливает Дерево по структуре данных в папке проекта. Применяется только при ошибке загрузки Дерева или, если замечено рассогласование данных на диске с Деревом или при ошибке загрузки Дерева обработки.

### Контекстное меню Дерева

Это главное операционное меню обработки - фактически, консоль пользователя. Каждая его команда,

кроме двух последних, запускает модуль XТото-LM для решения основной или сервисной задачи. Набор команд меню зависит от узла, на котором оно вызвано и состояния обработки. Так реализуется нужная дисциплина обработки. В следующей таблице в колонке "Узел/Проект" указан узел и тип проекта, на которых меню содержит команду, названную в колонке "Команда".

Таблица 3. Перечень команд меню Деревя обработки

Команда	Узел Проект	Действие
<b>Работа с моделью</b>		
<i>View Model</i>	m любой	Запускает графический модуль просмотра модели (Model Viewer).
<i>Edit Model</i>	m любой	Запускает графический модуль редактирования модели (Model Editor). Доступна, если нет дочерних узлов.
<b>Работа с системой наблюдений</b>		
<i>Import Spread</i>	o M-проект	Запускает модуль импорта системы наблюдений (Spread Importer).
<i>Import SRT Data</i>	o I-проект	Запускает модуль импорта SRT-данных (SRT Data Importer).
<i>View *** on Model Image</i>	o любой	В этой и следующих командах *** означат <i>Spread</i> (M-проект) или <i>Observations</i> (I-проект). Команда запускает графический модуль просмотра системы наблюдений модели на изображении модели (Graphic Spread Viewer).
<i>View *** As Ray Catalog Database</i>	o любой	Запускает модуль просмотра Каталога лучей в виде числовых таблиц (Ray Catalog Viewer).
<i>View *** As TX- Curve Set</i>	o I-проект	Запускает графический модуль просмотра Каталога лучей в виде системы годографов (TX-Curve Viewer). Команда доступна только при профильных наблюдениях.
<i>Edit Spread</i>	o M-проект	Запускает графический модуль редактирования системы наблюдений (Spread Editor), если нет дочерних узлов.
<i>Edit Ray Catalog Database</i>	o M-проект	Запускает модуль редактирования Каталога лучей (Ray Catalog Editor) , если нет дочерних узлов.
<b>Обращение годографов отраженных и головных волн</b>		
<i>Select TX-curves for inversion</i>	o I-проект	Запускает графический модуль подготовки системы годографов к обращению.
<i>Build Reflector</i>	o I-проект	Запускает модуль построения отражающего горизонта.
<i>Build Refractor</i>	o I-проект	Запускает модуль построения преломляющего горизонта.

<b>Решение кинематической прямой задачи и анализ решения</b>		
<i>Solve Forward Problem</i>	о любой	Создает дочерний f-узел и запускает модуль решения прямой задачи (Forward Problem Solver).
<i>View FPS Log</i>	о, f любой	Запускает программу просмотра протокола решения прямой задачи (Text Viewer). На о-узле просматриваются протоколы запусков, окончившихся неудачей; на f-узле – протокол запуска, который привел к созданию этого узла.
<i>View Catalog of Traced Rays</i>	f любой	Запускает модуль просмотра Каталога лучей (Ray Catalog Viewer) с расчетными временами, а в случае I-проекта – и с невязками.
<i>View Forward Problem Solution</i>	f любой	Запускает модуль просмотра и анализа решения прямой задачи (Forward Problem Viewer).
<b>Решение обратной задачи томографии</b>		
<i>Solve Inverse Problem</i>	f I-проект	Создает дочерний i-узел и запускает модуль решения обратной задачи (Inverse Problem Solver).
<i>Info on Inversion</i>	i I-проект	Запускает программу просмотра информации о решении обратной задачи (Text Viewer).
<i>View Inverse Problem Solution</i>	I I-проект	Запускает модуль просмотра решения обратной задачи (Inverse Problem Viewer).
<b>Поддержка Древа Обработки</b>		
<i>Expand Node</i>		Разворачивает выделенный узел.
<i>Create Package</i>		Создает сжатый файл с данными ветви Древа, которая завершается выделенным узлом. <a href="#">Подробнее.</a>

### Список активных модулей

На одном узле в некоторых случаях можно запустить более одного модуля. Могут быть одновременно активны модули, запущенные на разных узлах. Доступностью команд меню управляет Менеджер проектов. Запущенный модуль отображается в Списке активных модулей в левом нижнем углу окна Менеджера. В строке Списка указана аббревиатура названия модуля и код узла Древа, на котором он запущен. Во всплывающем меню Списка собраны команды "дистанционного" управления модулями, позволяющие минимизировать или восстановить главное окно, завершить модуль (*Close*) или принудительно прекратить выполнение (*Abort*). Команда *Close* корректно завершает работу модуля и его дочерних приложений. Команда *Abort* действует подобно команде "Снять задачу" Диспетчера задач Windows: выполнение останавливается, файлы закрываются без сохранения, прочие ресурсы освобождаются, дочерние процессы приложения могут остаться активными. Прибегать к команде *Abort* следует только в крайних случаях, например при зависании модуля или его дочерней программы.

## 6 Менеджер волн

Модуль запускается командой *Project/Wave Manager* или кнопкой панели инструментов Менеджера проектов. Главное окно модуля показано на рис. 1. На панели *Wave List* расположен собственно список волн, на панели *Drawing Attributes* – список атрибутов рисовки лучей и годографов выделенной в списке волны. Если при создании проекта Список волн не импортируется, Менеджер проектов создает Список волн по умолчанию, содержащий проходящую (diving) волну. Если задача не связана со слоистой моделью, то работать с Менеджером волн не приходится. В противном случае, необходимый набор отраженных и головных волн должен быть создан пользователем.

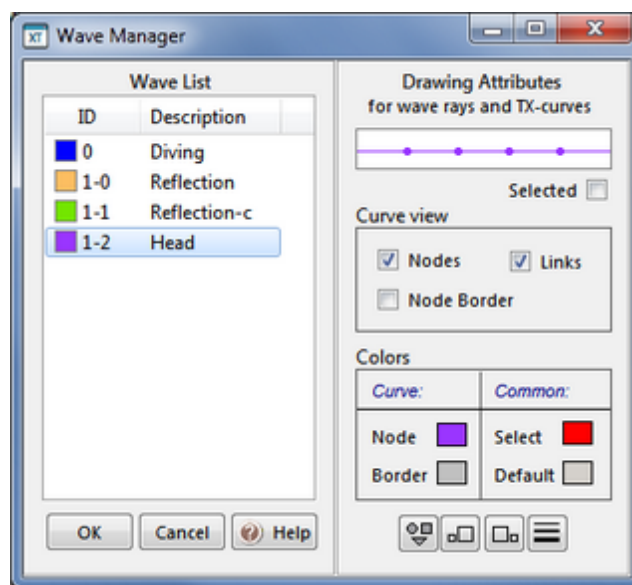


Рис. 1. Главное окно Менеджера волн.

### Добавление волн

Список имеет контекстное меню с тремя командами:

- Добавить (*Add*);
- Экспортировать волны (*Export Waves*);
- Импортировать волны (*Import Waves*).

По команде *Add* выводится диалог добавления отраженной или головной волны. На рис. 2 показан момент добавления обменной волны, образовавшейся при отражении от горизонта 2.

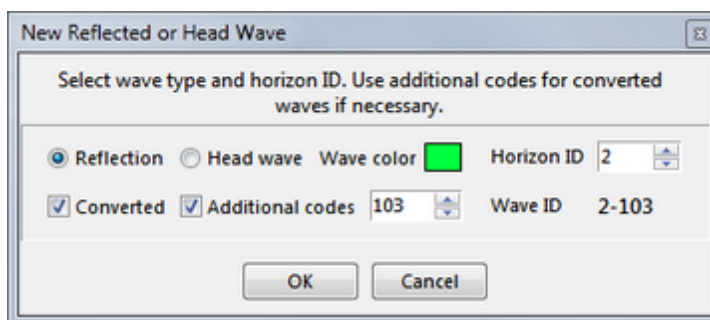


Рис. 2. Добавление волны.

Операционное поле диалога содержит две строки элементов управления. В первой задается тип волны, цвет волны и соответствие горизонту (поле прокрутки содержит возможные значения ID горизонта). Цвет должен быть уникальным в списке, как и код волны. Для назначения цвета следует щелкнуть по прямоугольнику *Wave Color*. Вторая строка используется только в случае обменной волны, когда пользователь поднимает флаг *Converted*. Если код обменной волны трехзначный, как в примере, следует поднять флаг *Additional Codes* (Дополнительные коды) и выбрать код в поле прокрутки. Щелчок по кнопке ОК добавляет новую волну в список с атрибутами рисовки по умолчанию. Волны не могут быть удалены из списка, поскольку ссылки на них содержатся в данных проекта.

Две другие команды меню позволяют сохранить список волн в пользовательском файле и импортировать список из такого файла в любом проекте. Последняя операция доступна только при наличии в списке единственной проходящей волны.

### Редактирование атрибутов рисовки кривых

В данном случае речь идет о кривых так или иначе связанных с волнами: лучи, годографы и пр. Кривая отображает некоторое множество чисел с плавающей точкой и состоит из точек, отвечающих числовым значениям и звеньев, их соединяющих. И те, и другие могут быть сделаны невидимыми. Атрибуты рисовки включают:

- флаг наличия точек (*Points/Node*);
- флаг наличия звеньев между точками (*Points/Links*);
- флаг наличия бордюра у точек (*Points/Node Border*);
- цвет точки и звена = цвет волны (*Colors/Curve/Node*);
- цвет бордюра (*Colors/Curve/Border*).
- форма точки (кнопка);
- размер точки (кнопки);
- толщина звена (кнопка).

Речь идет о кнопках внизу панели *Drawing Attributes*. В верхней части панели выводится образец кривой с текущими атрибутами. Панель *Colors/Common* содержит два цвета, относящихся ко всем волнам. *Select* – это цвет кривой, выделенной на рисунке. *Default* – цвет волны по умолчанию, используемый в диалоге добавления волны. Эти цвета являются зарезервированными.

Менеджер волн блокирует доступ к Менеджеру проектов во время работы. Редактирование Списка волн доступно только при отсутствии других запущенных модулей.

## 7 Спектр цветов скорости

Спектр цветов скорости позволяет визуально представить величину скорости при изображении модели в графических модулях. При создании проекта спектр создается автоматически с набором цветов по умолчанию. Изменить текущий спектр можно командой *Project/Velocity Color Spectrum* главного меню Менеджер проектов. Команда запускает модуль Менеджер спектра, главное окно которого (рис. 1а) изображает текущий спектр,

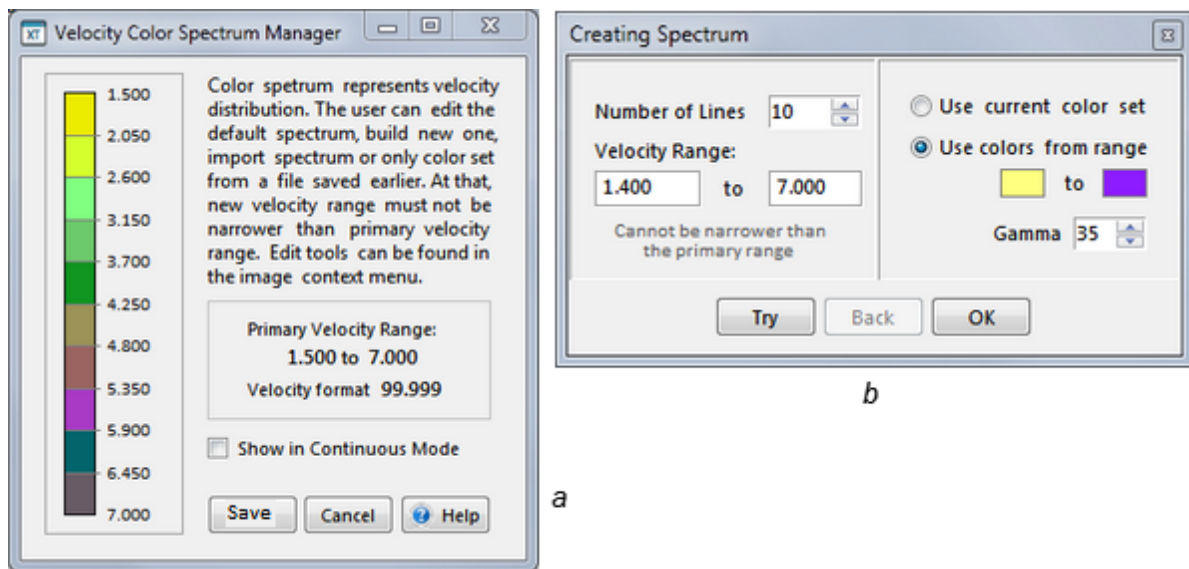


Рис. 1. Менеджер спектра. а – главное окно; б – создание нового спектра.

границы скорости в начальной модели и формат скорости. Спектр – это набор пар "цвет – скорость". На рисунке пара изображается цветовым прямоугольником (*линия спектра*) и форматированным значением скорости у верхней правой вершины. Так выглядит *линейчатый* спектр. Флаг *Show in Continuous Mode* (Вывести как непрерывный) выводит спектр в режиме непрерывного изменения цвета.

Команды редактирования собраны в контекстном меню изображения спектра (Таблица 1). Все команды, кроме одной, выводят диалоги; в каждом имеется кнопка *Try*, позволяющая посмотреть, как изменится изображение спектра после сделанных изменений. Изменения в спектре, сделанные в сеансе редактирования, вступают в силу, если модуль будет закрыт кнопкой *Save*.

Таблица 1. Команды редактирования

Команда	Действие
<i>Create new</i>	Выводит диалог <i>Creating Spectrum</i> создания спектра (см. ниже).
<i>Adjust Luminance</i>	Выводит диалог регулировки яркости.
<i>Edit Color Lines</i>	Выводит диалог <i>Line Editor</i> для редактирования цветов и значений скорости (см. ниже).

<i>Edit Format</i>	Выводит диалог изменения формата скорости в свойствах проекта.
<i>Default</i>	Заменяет текущий спектр спектром по умолчанию с текущими границами скорости.
<i>Export/Import</i>	Выводит диалог для сохранения текущего спектра в пользовательский файл (.usf) или для импорта спектра из такого файла. Файл содержит спектр полностью: цвета и значения скорости. Если диапазон скорости в файле уже, чем у текущего спектра, спектр не импортируется.
<i>Color Sets</i>	Открывает диалог <i>Export/Import of Color Sets</i> для работы с наборами цветов (см. ниже).

### Создание спектра

Создание нового спектра требует определения числа линий, диапазона скоростей, спектра и набора цветов. В левой секции диалога *Creating Spectrum* (рис. 1b) содержатся три поля ввода для числа линий и границ диапазона скорости (*Velocity Range*). Цвета определяются в правой секции. Можно сохранить текущие цвета, а можно задать новые. Поднимите флаг у нужной опции. Новый набор цветов задается путем интерполяции между двумя заданными цветами, ассоциированными с границами диапазона скорости. Выберите опорные цвета щелчком по цветовым прямоугольникам. Степень нелинейности интерполяции регулируется параметром гамма. Изменяя гамма, можно смещать цвета спектра к первому или второму опорным цветам. Чтобы посмотреть на результат, щелкните по кнопке *Try*, и новый спектр заменит исходный в главном окне модуля. Если результат не удовлетворителен, щелкните по кнопке *Back*. Для фиксации окончательного выбора, щелкните по кнопке *OK*.

### Редактирование линий спектра

Созданный путем интерполяции спектр можно уточнить, с помощью редактирования индивидуальных линий спектра (команда *Edit Color Lines*). Диалог *Line Editor* представляет линии спектра в виде списка (рис. 2a). При необходимости окно диалога растягивается по вертикали. Выделите строку списка и вызовите контекстное меню. Перечень команд меню приведен в таблице 2.



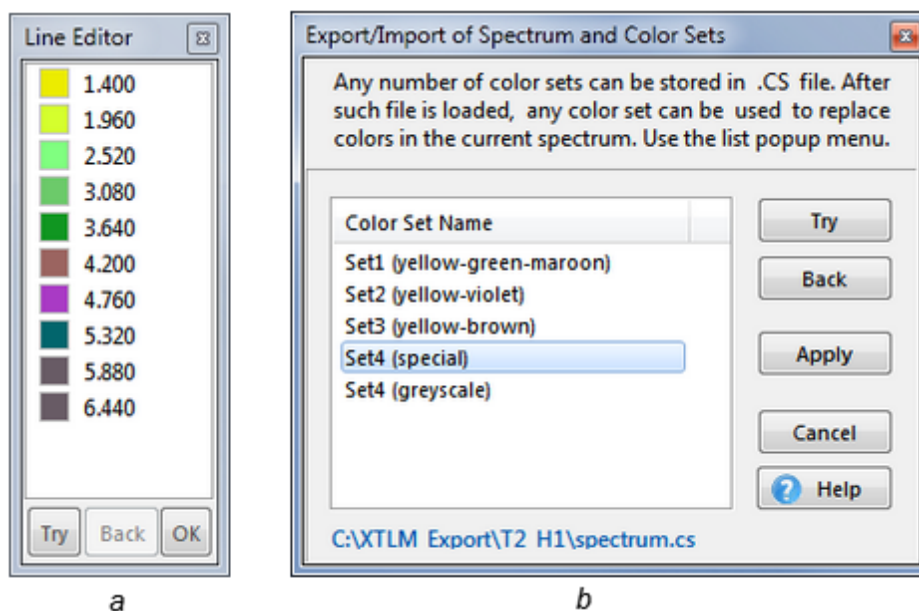


Рис. 2. Менеджер спектра. а – редактирование линий спектра; б – список наборов цветов в CS-файле.

Таблица 2. Команды редактирования линий спектра

Команда	Действие
<i>Edit Value</i>	Позволяет изменить значение скорости на выделенной линии.
<i>Edit Color</i>	Позволяет изменить цвет линии.
<i>Insert before</i> <i>Insert after</i>	Вставляет новую линию перед или после выделенной линии.
<i>Delete</i>	Удаляет выделенную линию спектра.

### Цветовые наборы

Обычно пользователи применяют несколько стандартных цветовых наборов (Color set) во всех своих проектах. Набор цветов не связан с конкретными значениями скорости. Для хранения цветовых наборов служат файлы формата CS. Один такой файл может хранить любое число наборов, маркированных уникальными именами. Файлы создает пользователь. Команда *Color Sets* меню главного окна модуля открывает диалог для работы с цветовыми наборами (рис. 2b). Он содержит список имен цветовых наборов в загруженном CS файле. При вызове диалога список пуст. Управление осуществляется командами контекстного меню списка и кнопками. Вот список типичных операций.

1. Сохранение набора цветов текущего спектра в новом файле. Используйте команды меню *Add Current* (набор добавляется в список с именем по умолчанию), *Edit Name* (изменить имя по умолчанию) и *Save As* (сохранить в файл).
2. Добавление набора цветов текущего спектра к существующему файлу. Загрузите содержимое файла командой меню *Load CS File*, а затем действуйте, как в п. 1.
3. Просмотр цветовых наборов из файла. Загрузите содержимое файла командой меню *Load CS File*. Выделите имя набора в списке имен и щелкните по кнопке *Try*. Цвета в текущем спектре заменятся на цвета из набора. Кнопка *Back* возвращает спектр в исходное состояние. Если градаций скорости больше, чем цветов в наборе, "лишние" линии окрашиваются цветом по умолчанию.

4. Применение цветового набора из файла. Загрузите файл и выделите нужное имя в списке. Затем щелкните по кнопке *Apply*. Диалог закрывается, а спектр получит цвета выделенного набора.

### Черные ячейки

Если в ходе обработки возникнет ситуация, при которой значение скорости в ячейке выйдет за пределы текущего спектра, ячейка окрашивается в черный цвет. Наличие черных ячеек на изображении модели указывает пользователю на необходимость расширить диапазон скорости в Менеджере спектра.

## 8 Пакеты, архивы, XТомо-LM 2

Речь идет о сжатых файлах, в которых хранятся данные проектов – частично (пакет) или полностью (архив). Эти файлы помещаются Менеджером проектов (или пользователем, если они созданы на другой рабочей станции) в архивную папку проекта (см. [здесь](#)).

### Пакеты

Пакеты используются для оперативного обмена информацией при обработке одних и тех же материалов на разных площадках. Пакеты могут быть использованы и в других случаях, а также при обращении в службу поддержки при возникновении программных ошибок. Пакет хранит данные одной ветви Древа обработки. В открытом проекте вызовите контекстное меню на узле Древа обработки. По команде *Create Package* создается пакет, в котором хранятся (1) данные узла и всех узлов, являющихся прямыми предками выделенного вплоть до корневого; (2) инфраструктура проекта. Имя пакета составляется программой. Оно включает время создания, имя проекта и код выделенного узла. Менять имя нельзя. Пакет создается в архивной папке проекта. Из нее пакет можно перенести на сменный носитель, передать по сети или через Интернет.

Получатель пакета помещает его в архивную папку XТомо-LM 3 на своей рабочей станции, запускает Менеджер проектов и в меню *Working Folder* выбирает команду *Add Project from... Package or Archive*. Команда выводит диалог *Creating Project from Package or Archive* (рис.1а). Назначение диалога – создать из пакета (архива) новый проект. Диалог показывает список файлов одного типа в архивной папке, т.е. либо пакетов, либо архивов. Переключатель типов находится под списком. Выделите в списке нужный файл. Имена файлов длинные, но они дублируются в подсказке. В поле *Project Name* выводится имя проекта из пакета (архива). Отредактируйте его, если нужно, и нажмите кнопку *Create*. После закрытия диалога новый проект появится в Списке проектов. В созданном проекте путь к папке импорта/экспорта, скорее всего, недействителен. Его следует исправить в свойствах проекта.

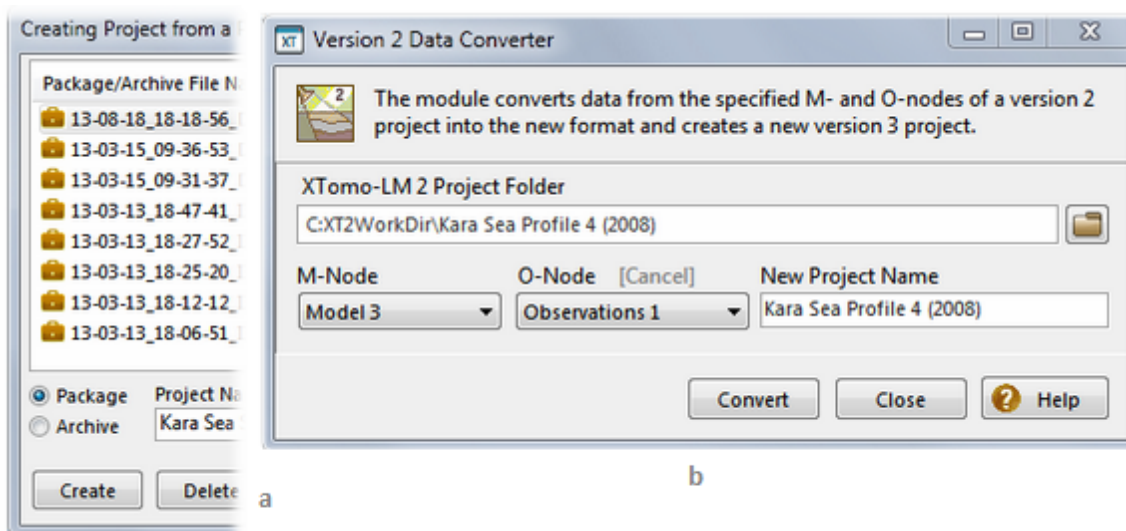


Рис. 1. Создание проекта: а – из пакета или архива; б – путем конвертации данных проекта версии 2.

Диалог можно также использовать для очистки архивной папки. Кнопка *Delete* удаляет из папки все файлы, выделенные в списке. Множественное выделение файлов осуществляется, как в Проводнике Windows.

### Архивы

Архивы проектов используются для длительного хранения или перемещения данных. Архивация производится командой *Archive* контекстного меню Списка проектов. Разумеется, проект должен быть закрыт. Для разархивации следует действовать, как описано в предыдущем пункте в отношении пакетов.

### Конвертация данных из проектов версии 2

Менеджер проектов может создать новый проект, использующий данные из проекта XTomo-LM 2.x, если это ПО установлено на компьютере. Операцию выполняет модуль, который Менеджер проектов запускает по команде меню *Working Folder|Add Project From XTomo-LM 2*. Модуль блокирует доступ к Менеджеру проектов до завершения операции. Главное окно модуля показано на рис. 1б.

Кнопка справа от поля *XTomo-LM 2 Project Folder* вызывает браузер локальных папок. Выберите в нем папку нужного проекта версии 2. После выбора выпадающий список *M-Node* заполняется именами корневых узлов Древа обработки проекта. Выберите нужный узел *Model*. Из списка *O-Node* дочерних узлов *Observations* выберите нужный узел. Если конвертируется только модель, очистите поле *O-Node*, щелкнув по ссылке *[Cancel]*. Если нужно, измените имя проекта в поле *New Project Name*. Щелкните по кнопке *Convert*.

Созданный проект имеет такой же Список волн, как исходный проект и спектр цветов скорости по умолчанию. Возможно, придется скорректировать путь к папке импорта/экспорта в свойствах проекта.

## Изображение модели

### 1 Графические модули

Графические модули используют изображение модели в качестве основы пользовательского интерфейса. Модуль этого типа может быть либо программой просмотра (viewer), либо редактором (editor). Простейшим графическим модулем является приложение для просмотра модели (Model Viewer, MOV), который запускается на корневом узле Model Дерева обработки. На примере MOV в этой главе поясняются особенности пользовательского интерфейса графических модулей. Большая часть работы модулей состоит в воспроизведении графической информации: карты скорости, профилей скорости, лучей, годографов. Скорость вывода существенно зависит от производительности дисковой системы, центрального и графического процессоров рабочей станции. В некоторых специальных случаях, например, при выводе большого числа лучей, время ожидания может быть значительным.

#### **Дизайн главного окна**

Главное окно MOV показано на рис. 1. Снимок с экрана для рис. 1 сделан в режиме, при котором линии решетки не видны. Очень густая решетка, которая в данном случае позволяет отобразить нюансы геометрии модели, искажает цвет ячеек. Жирными линиями показаны сейсмические горизонты. Спектр цветов скорости переключен в режим *Continuous* (непрерывный), чтобы избежать появления фиктивных линий перепада скоростей.

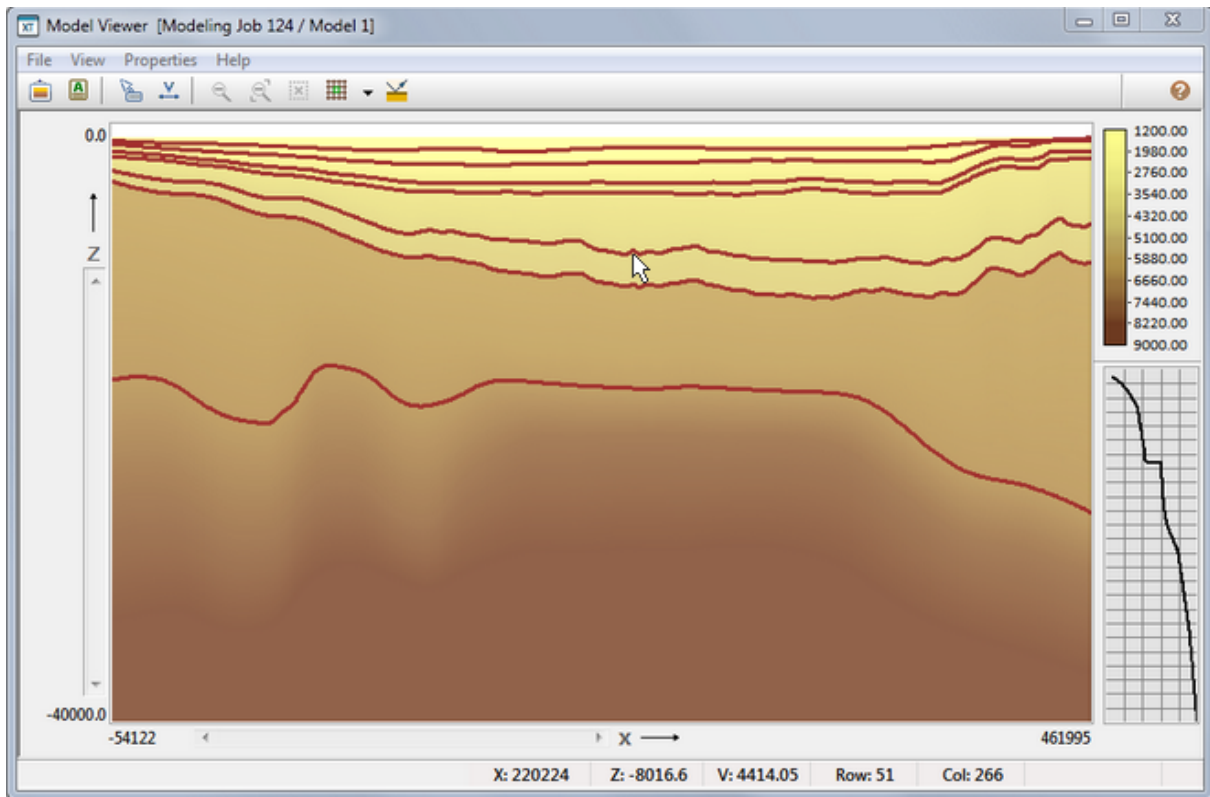


Рис. 1. Изображение модели в модуле Model Viewer.

В центре главного окна расположен *планшет* – поверхность рисовки изображения модели: всего, как на рисунке, или его части – *кадра* при увеличении. Левое и нижнее поля планшета содержат надписи (имена осей и координаты), а также полосы прокрутки. Под нижним полем находится *статусная панель* для отображения контекстной информации, связанной с текущим положением курсора: координаты точки X и Z, скорость в ячейке V и индексы ячейки Row (ряд) и Col (колонка). Правое поле планшета содержит две панели, размеры которых можно изменять, перетаскивая разделительную линию. Верхняя панель содержит изображение спектра цветов скорости, нижняя изображает профиль скорости  $V(z)$  вдоль колонки Col под курсором.

## Меню

Органы управления модулем состоят из главного меню и инструментальной панели, а также контекстных меню планшета и спектра. Меню планшета рассматривается в следующем разделе. Меню спектра содержит переключатели *Линейчатый/Непрерывный* и *Спрятать/Показать*. Список команд главного меню приведен в Таблице 1.

Таблица 1. Команды главного меню

Команда	Действие
<b>Меню File</b>	
<i>Export Model Image</i>	Вызывает диалог для экспорта изображения модели в графический файл. <a href="#">Подробнее</a> .
<i>Export Model to ASCII Files</i>	Вызывает диалог для экспорта модели и ее компонентов в текстовые файлы.

<i>Exit</i>	Выход из программы.
<b>Меню View</b>	
<i>Zoom out</i>	Снимает увеличение. <a href="#">Подробнее</a> .
<i>Decrement Zoom</i>	Уменьшает увеличение. <a href="#">Подробнее</a> .
<i>X, Z, V under Cursor</i>	Включает/выключает опцию вывода контекстных данных из статусной панели в окне подсказки непосредственно рядом с курсором.
<i>Color Spectrum</i>	Переключатель Показать/Спрятать для изображения спектра.
<i>Right Margin</i>	Переключатель Показать/Спрятать для правого поля планшета.
<i>Velocity Profile on a Row</i>	Переключатель Показать/Спрятать для окна, содержащего горизонтальный профиль скорости вдоль ряда решетки под курсором.
<i>Repaint at Resize Time</i>	Переключатель режима перерисовки планшета при изменении размеров окна. По умолчанию: не перерисовывать. В другом режиме программа пытается перерисовать окно при каждом новом размере в ходе операции. Этот режим имеет смысл включать только для редкой решетки.
<i>Update View</i>	Перерисовывает текущее содержимое планшета.
<b>Меню Properties</b>	
<i>Grid Properties</i>	Выводит диалог с параметрами изображения модели и ее свойствами (см. ниже).
<i>Horizon List</i>	Выводит Список горизонтов модели (см. ниже).
<i>Scroll Properties</i>	Выводит диалог для регулировки инкрементов полос прокрутки. Инкременты показывают, на сколько сдвигается кадр при щелчке по кнопкам полосы прокрутки. Задаются в процентах к измерению кадра.
<b>Меню Help</b>	
<i>Introduction</i>	Выводит первый раздел данного документа.
<i>Help TOC</i>	Выводит оглавление (Table of Contents) и раздел с обзором XТомo-LM.
<i>Model Viewer</i>	Выводит первый раздел данной главы.
<i>Hot Keys</i>	Выводит информацию о <a href="#">быстрых клавишах</a> перемещения и выделения.
<i>About</i>	Выводит информацию о продукте и модуле.

### Свойства решетки и изображения

Команды меню *Properties* выводят информацию о свойствах модели, решетки и изображения. Диалог *Grid Properties* (Свойства решетки) показан на рис. 2а.

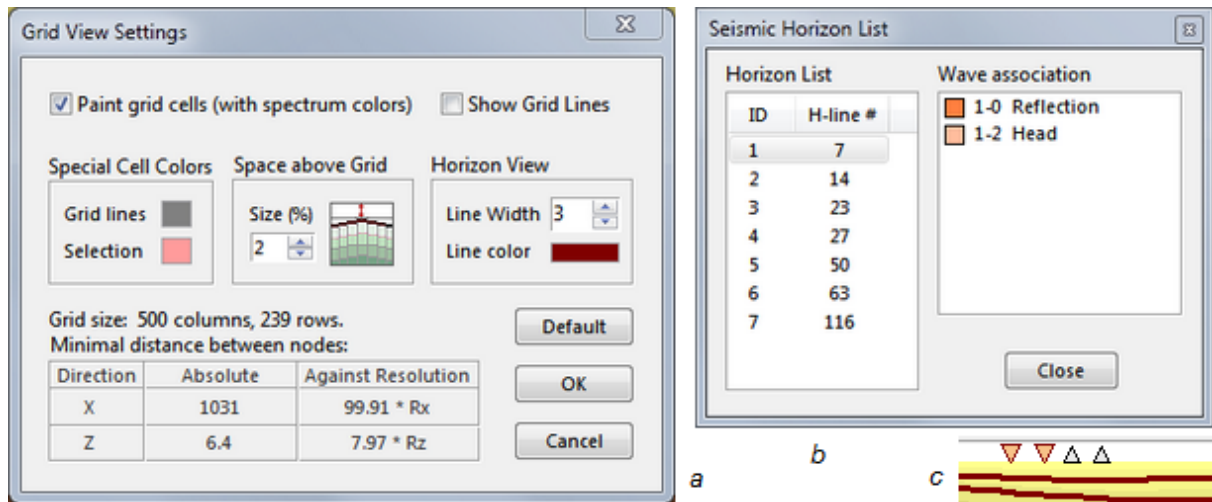


Рис. 2. Диалоги, вызываемые из меню Properties.  
а – свойства решетки; б – список горизонтов; с – пустое пространство над решеткой.

Флаг *Paint Grid Cells* (Заливать ячейки) управляет цветом ячеек. Если он поднят, они заливаются цветом в соответствии со значением скорости и спектром. В противном случае, выводятся только линии решетки. Флаг *Show Grid Lines* (Показать линии решетки) управляет выводом линий решетки. Переключать флаги можно и без вызова диалога, если воспользоваться выпадающим меню соответствующей кнопки на панели инструментов.

На панели *Special Cell Colors* можно изменить цвета вывода выделенных ячеек и линий решетки. Панель *Space above Grid* позволяет изменять размер пустого пространства над верхней границей модели. Оно не имеет никакого физического смысла и используется для вывода символов источников и приемников, которые часто располагаются именно на верхней границе модели (рис. 2с). Размер пустой полосы задается в процентах к вертикальному размеру прямоугольника модели. Панель *Horizon View* позволяет изменить цвет и толщину линии горизонта.

Остальная часть диалога содержит текстовую информацию о размерах решетки (Grid Size) и текущих минимальных расстояниях между линиями решетки в абсолютных единицах и относительно разрешения.

Диалог *Seismic Horizon List* (рис. 2б) выводит список горизонтов модели. Для каждого горизонта выводится ID и номер h-линии. Для выделенного горизонта в поле *Wave Association* перечисляются волны, соответствующие этому горизонту в Списке волн.

## 2 Увеличение и выделение

Инструменты выделения и увеличения называются *селектором* и *лупой*. Селектор позволяет выделить (select) элементы изображения для последующих операций с ними. Селектор включает *резиновый контур* и два меню: меню резинового контура (*рк-меню*) и контекстное меню планшета.

Лупа (zoom) – это механизм увеличения изображения, работающий по принципу растягивания содержимого резинового контура на весь планшет. Увеличение можно повторять последовательно до тех пор, пока реальные размеры области не выйдут на уровень разрешения. Если изображение увеличено, его прокрутка в пределах планшета обеспечивается следующими средствами:

- полосами прокрутки (вертикальной и горизонтальной);
- колесиком мыши (вертикально или – при утопленной клавише Shift – горизонтально);

- перетаскиванием изображения в планшете с утопленной клавишей Ctrl (в любом направлении) .

В режиме увеличения можно выполнять те же операции, что и без него.

Чтобы выделить область изображения, следует нажать левую кнопку мыши и "перетащить" точку, на которую указывал курсор, в направлении, отличном от горизонтального и вертикального. При этом на экран выводится прямоугольный контур. При отпускании мыши у правого нижнего угла контура выводится рк-меню (рис. 1а).

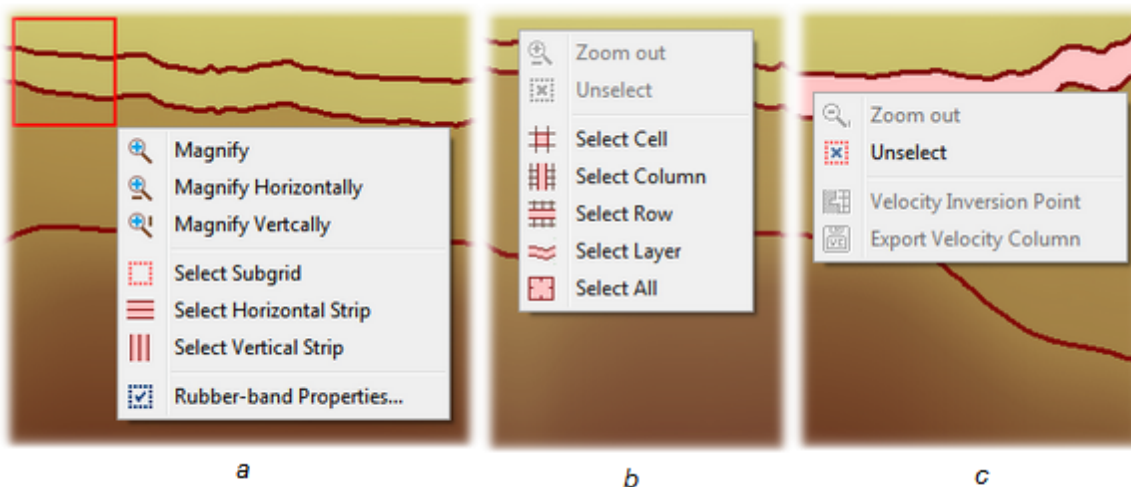


Рис. 1. Селектор. а – рк-меню; б – меню планшета без выделения; с – то же меню при наличии выделения.

## Меню

Контекстное меню планшета имеет разный набор команд в зависимости от того, существуют ли на изображении выделенные элементы или нет. Если – нет, оно содержит команды выделения и снятия увеличения (рис. 1б), если есть – команды выполнения операции над выделением (рис. 1с).

Чтобы увеличить (magnify, zoom in) содержимое резинового контура до размеров планшета, в рк-меню выберите одну из команд *Magnify*. Чтобы снять увеличение полностью в контекстном меню планшета выберите *Zoom out*. Команда дублируется в меню *View*. Меню *View* также содержит команду *Decrement Zoom*, которая выполняет снятие увеличения по шагам, обращая последовательность увеличений.

## Опции выделения

В модуле Model Viewer (MOV) выделять можно только стандартные подмножества решетки. Каждое такое подмножество однозначно определяется прямоугольником резинового контура по определенным правилам. Их легко понять, экспериментируя с выделением. Выделенные подмножества окрашиваются цветом выделения, заданным в свойствах решетки. *Перед каждым новым выделением старое должно быть отменено*. Для развыделения любых частей изображения используйте команду *Unselect* в меню планшета или кнопку панели инструментов. В момент выделения под планшетом появляется описание выделенного множества, которое выглядит примерно так: **Row 14 - 54; Col 45 - 67; V\* = 4.500**. Здесь указаны диапазоны строк и колонок выделения, а также среднее значение скорости в ячейках V\*.

## Быстрые клавиши

Некоторые операции выделения и увеличения можно выполнить без меню с помощью быстрых клавиш (таблица 1).



Таблица 1. Альтернативные способы работы с лупой и селектором

Операция	Способ
Снять увеличение	Ctrl + Z
Прокрутка под лупой	Ctrl + перетаскивание планшета
Выделить ячейку	Двойной щелчок
Выделить колонку	Ctrl + Двойной щелчок
Выделить ряд	Shift + Двойной щелчок
Развыделить все	Двойной щелчок по планшету
Выделить подрешетку	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Двойной щелчок по ячейке у левой верхней вершины подрешетки (ячейка будет выделена);</li> <li>2. Ctrl + Двойной щелчок по ячейке у правой нижней вершины</li> </ol>

### Случай выделения колонки

Если в модели выделена колонка, становятся доступными две последних команды меню планшета (рис. 1с). Команда *Velocity Inversion Point* проверяет, есть ли в колонке инверсия скорости. Команда *Export Velocity column* добавляет колонку в указанный файл формата [VC](#).

При наличии выделенной колонки вертикальный профиль скорости на правом поле планшета приобретает новые свойства: (1) выводится только профиль скорости для выделенной колонки независимо от положения курсора; (2) под графиком выводится номер выделенной колонки; (3) если курсор перемещается над профилем, в окне подсказки выводятся координаты (Z, V). Аналогично ведет себя окно с горизонтальным профилем, когда в решетке выделен ряд.

## 3 Экспорт

### Экспорт в ASCII файлы

Компоненты модели могут быть выведены в текстовый файл с целью обмена данными, в т.ч. с другими приложениями. Команда *File/Export Model to ASCII File* выводит диалог, показанный на рис. 1.

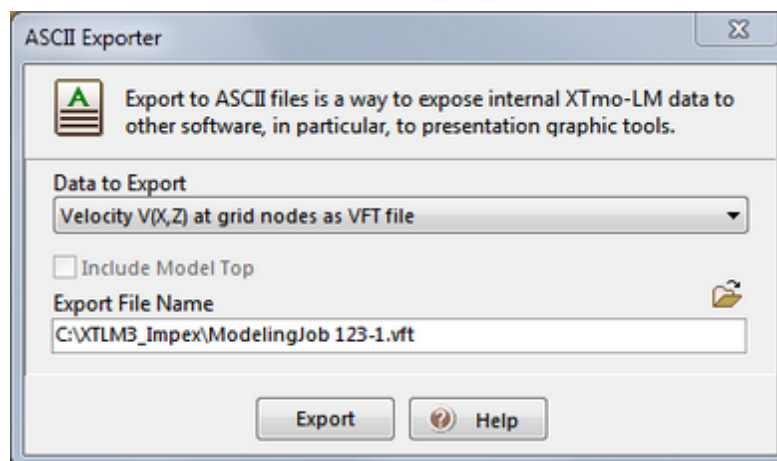


Рис. 1. Диалог экспорта в текстовые файлы с кодировкой ASCII.

Выпадающий список опций экспорта включает такие опции:

- скорость  $V(x, z)$  в узлах решетки как файл формата VFT;
- скорость  $V(x, z)$  в узлах решетки как файл формата DAT;
- горизонты модели как файл формата MG;
- горизонты модели как файл формата BLN.

**VFT** и **MG** – это форматы XTomo-LM для скорости на криволинейной решетке и набора кривых. Форматы **DAT** и **BLN** используются для тех же целей рядом других приложений, в т.ч. Surfer™. При экспорте горизонтов флаг *Include Model Top* позволяет включить в число горизонтов верхнюю границу модели. Для выполнения экспорта выберите нужную опцию, а затем – имя выходного файла и щелкните по кнопке *Export*. Диалог выбора файла при первом вызове открывает папку импорта/экспорта проекта.

Еще одна функция экспорта описана в разделе Селектор и лупа: **добавление** скоростной колонки в файл формата VC. Другие графические модули могут иметь свои собственные списки опций экспорта, а иногда требовать определения и параметров экспорта.

### Экспорт в графические файлы

Изображение модели в графическом модуле можно вывести в графический файл. Это не просто копирование области экрана. Изображения указанной области модели создается заново. Оно имеет настраиваемые пользователем размеры, имеет оси с делениями и надписями, заголовки, предусматривает выбор шрифтов. Диалог *Image Export* выводится командой *File/Export Model Image*. Первая вкладка диалога показана на рис. 2а.

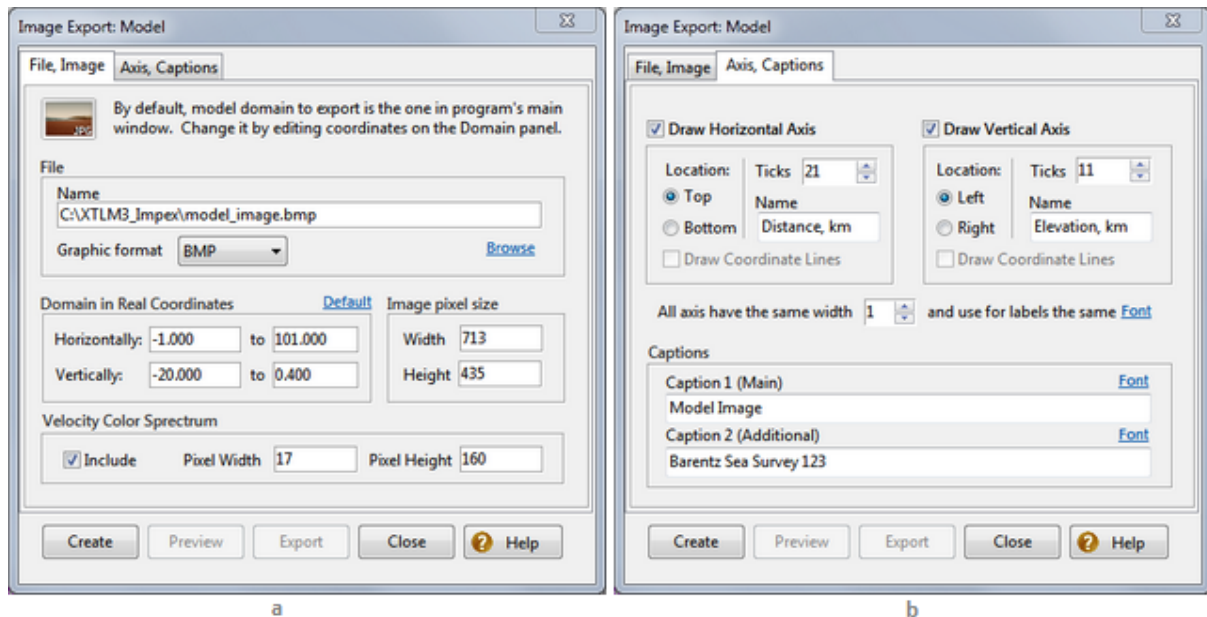


Рис. 2. Экспорт в графический файл. а – вкладка 1; б – вкладка 2.

Экспорт изображения обычно проводится в три шага:

- 1) формирование задания (редактирование полей диалога);
- 2) создание изображения (кнопка *Create*) и предварительный просмотр (кнопка *Preview*);
- 3) экспорт в файлы указанных форматов (кнопка *Export*).

Назначение имени файла и выбор формата можно отложить до шага 3). На панели *Domain in Real Coordinates* задаются диапазоны изменения координат, определяющие область модели. По умолчанию они совпадают с областью на планшете. Ссылка *Default* восстанавливает область по умолчанию. При редактировании полей их значения автоматически корректируются, если они задают более широкую область, чем прямоугольник модели.

На панели *Image Pixel Size* определяется размер изображения в пикселях. По умолчанию он совпадает с размером планшета. На панели *Velocity Color Spectrum* следует отметить включать ли в изображение спектр (флаг *Include*). Можно изменить его размеры, если необходимо.

На второй вкладке (рис. 2б) заполняются параметры вывода осей. Флаги *Draw Axis* означают "рисовать/не рисовать ось". Каждой оси отвечает своя панель, в полях которой задаются ее положение по отношению к модели (флаги *Top/Bottom* или *Left/Right*), число делений оси (*Ticks*) и название оси (*Name*). Ниже задаются ширина линии оси и шрифт вывода надписей. Чтобы посмотреть, какой выбран шрифт, наведите курсор на нужную ссылку *Font*. Свойства шрифта появятся в окне подсказки. Панель *Captions* служит для задания двух заголовков изображения и их шрифтов. Если поле заголовка пусто, он не выводится.

После заполнения полей щелкните по кнопке *Create*. Когда изображение готово, становятся доступными остальные кнопки управления. *Preview* выводит изображение на экран с помощью приложения, закрепленного в Windows по умолчанию для файла типа BMP. Теперь можно выбрать файл для экспорта (ссылка *Browse*), и выбрать графический формат. Доступны 4 формата файлов BMP, GIF, PNG, JPG (без сжатия) с глубиной цвета 24 бита. Можно вывести изображение последовательно в файлы всех форматов.

# Редактирование модели

## 1 Модуль редактирования

### Model Editor (MED)

Модуль Model Editor (MED) запускается командой меню Дерева обработки на корневом узле *без потомков*. При наличии дочерних узлов модель можно только просматривать. MED представляет собой графический модуль, реализующий графическое редактирование. Он включает всю функциональность простейшего графического модуля Model Viewer, включая экспорт. Общие средства поддержки редактирования включают:

- загрузку исходной модели в любой момент редактирования (команда File|Reload);
- сохранение текущего состояния в любой момент редактирования (команда File|Save);
- возможность отказа от сделанных изменений в конце сеанса редактирования;
- поддержка стека последних изменений и операций Назад (отмена) и Вперед (возврат).

Команды редактирования помещены в меню *Edit* (главное меню), рк-меню и контекстное меню планшета. Операции редактирования модели рассматриваются в следующей последовательности:

- изменение густоты решетки;
- редактор кривых;
- редактирование геометрии решетки;
- редактирование скорости.

В этом перечне импорт элементов модели входит в понятие редактирования.

**Важное замечание.** Изменение геометрии и изменение скорости не являются независимыми действиями. Точная формулировка будет дана [здесь](#).

### Редактирование верхней границы модели

Эта операция (если она необходима) является первой в логике обработки XТомо-LM. Ее можно осуществить только в начале обработки, когда в Дереве имеется только один узел Model 1 с начальной моделью. Редактирование верхней границы модели в других корневых узлах привело бы к неустрашимым противоречиям. Именно в этот момент обработки в модель можно ввести, например, нивелировочный разрез. Команды редактирования верхней границы содержатся только в меню *Edit*. В этом меню *inner h-line* (внутренняя h-линия) в названиях команд подчеркивает, что они не относятся к верхней границе модели. Во всех других меню "h-line" означает внутреннюю h-линию.

### Область возмущения решетки (GRA)

Изменение формы h-линии влечет перестройку решетки. Формально это необходимо, чтобы исключить пересечение h-линий. На рис 1. показан фрагмент решетки до и после изменения формы сейсмического горизонта. Выделенный ряд определяет редактируемую h-линию. Видим, что редактирование h-линии вызывает возмущение части решетки. Размером возмущенной части можно управлять.

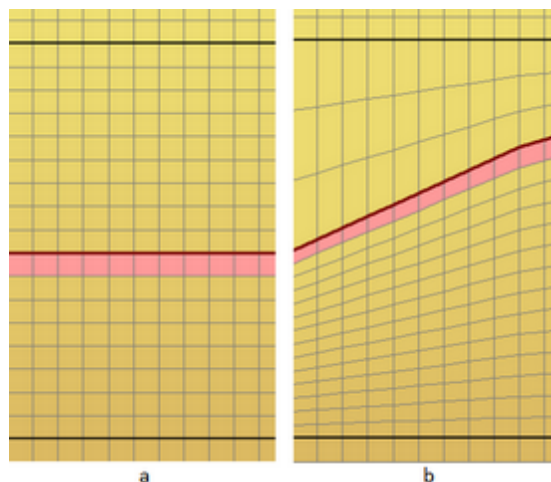



Рис. 1. Перестройка решетки, вызванная изменением формы сейсмической границы.  
а – исходный горизонт; б – горизонт после редактирования.

На рис. 1b видно, что возмущение ограничивается областью между черными h-линиями. Ограниченная ими полоса называется *областью возмущения решетки* (Grid Perturbation Area, GPA). Аббревиатура GPA встречается в пользовательском интерфейсе редактора. Перед операциями создания, перемещения, редактирования и импорта h-линий (в т.ч. верхней границы модели) пользователь должен определить GPA.

Область возмущения нужна, чтобы изолировать интервалы разреза, в которых располагаются редактируемые h-линии, в частности сейсмические горизонты. Иначе изменение одного повлекло бы изменение другого. Поэтому полоса с двумя и более горизонтами не может быть выбрана в качестве GPA. По этой же причине, если GPA содержит горизонт, он является единственной h-линией, которую можно редактировать; такая GPA не может быть использована для создания новой h-линии или ее импорта. Алгоритм перестройки сохраняет число h-линий внутри GPA, но может изменять число линий выше и ниже редактируемой линии. Типичная ошибка при редактировании и перемещении h-линий – это ошибка разрешения.

Область возмущения определяется номерами верхней и нижней h-линии. Проще всего задать GPA с помощью резинового контура, подобно тому, как выделяется полоса решетки. В рк-меню для этого предусмотрена команда *Define Grid Perturbation Area*. Другой способ – вызвать диалог командой *Edit/Set Grid Perturbation Area* или кнопкой панели инструментов. Диалог позволяет ввести номера границ GPA непосредственно или увидеть номера границ текущей области возмущения. Если одно из полей ввода оставлено пустым, существующая область аннулируется. В диалоге можно также изменить атрибуты рисовки границ GPA. Быстрые команды создания/отмены GPA содержатся в выпадающем меню кнопки .

## 2 Изменение густоты решетки

### Команды

Частота линий решетки определяет детальность, с которой задаются скорость и форма h-линий. Все операции изменения частоты линий относятся к подобласти модели. Сначала следует выделить стандартную подобласть командами рк-меню или контекстного меню планшета, а затем (снова) вызвать меню планшета и выбрать в нем одну из команд, перечисленных в таблице 1. В колонке "Область" указано, для каких выделенных подобластей команда доступна.

Таблица 1. Команды изменения густоты решетки в меню планшета файла

Команда	Область	Действие
<i>Insert Rows</i>	ряд	Вставляет указанное число h-линий внутрь ряда, в т.ч. с изменяющимся шагом (см. ниже).
<i>Insert Columns</i>	колонка	Вставляет указанное число вертикалей внутрь колонки, в т.ч. с изменяющимся шагом (см. ниже).
<i>Delete Selected</i>	ряд, колонка, полоса	Удаляет из решетки все выделенные ряды или колонки.
<i>Double Number of Rows</i>	ряд, h-полоса	Удваивает число рядов в выделенной подобласти.
<i>Halve Number of Rows</i>	h-полоса	Уменьшает вдвое число выделенных рядов.
<i>Double Number of Columns</i>	колонка, v-полоса	Удваивает число колонок в выделенной подобласти.
<i>Halve Number of Columns</i>	v-полоса	Уменьшает вдвое число выделенных колонок.

### Вставка рядов и колонок

Команда *Insert Rows* выводит диалог, показанный на рис. 1. Пользователь должен указать число N вставляемых h-линий и модификатор M расстояния. M – действительное число из интервала [0.5, 2.0]. При M = 1 вставленные h-линии располагаются на одинаковых расстояниях друг от друга. В противном случае расстояния будут увеличиваться (M > 1) или уменьшаться в геометрической прогрессии со знаменателем M.

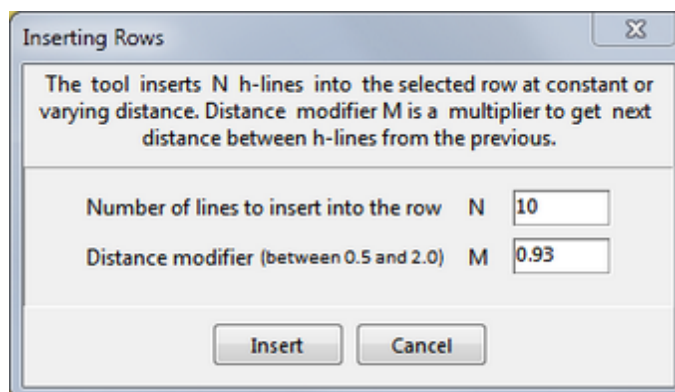


Рис. 1. Диалог вставки h-линий.

Вставка колонок происходит аналогично. При вставке рядов и колонок, а также при удвоении их числа возможны ошибки разрешения. При возникновении ошибки операция отменяется, решетка остается прежней.

### 3 Редактор кривых

Графический Редактор кривых вызывается командами создания и редактирования h-линии (горизонта) или верхней границы модели. На экране появляется диалоговое окно *Curve Editor*.

#### Планшет

На планшете Редактора кривая изображается в точках равномерной сетки (рис. 1а), число узлов которой по горизонтали ( $N$ ) нельзя изменить в текущем сеансе работы. Редактируемая h-линия пересчитывается на эту сетку. При этом возможна потеря информации, тем меньшая, чем больше  $N$ .

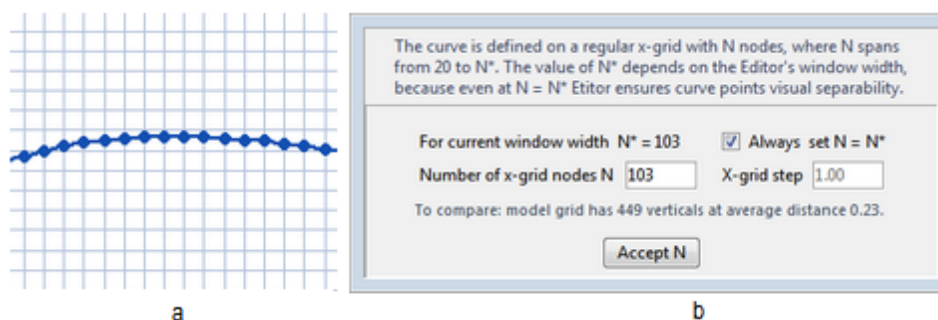


Рис. 1. Редактор кривых. а – изображение кривой; б – определение числа узлов x-сетки.

Планшет изображает кривую целиком; механизм увеличения отсутствует. Поэтому  $N$  ограничено сверху таким значением  $N^*$ , чтобы при  $N = N^*$  точки кривой с размером по умолчанию все еще можно было уверенно различить визуально. Понятно, что  $N^*$  зависит от ширины окна Редактора. При вызове окно появляется на экране так, чтобы его планшет и планшет с изображением модели в главном окне модуля совпадали по ширине. Посредине планшета Редактора кривых выводится панель для определения  $N$  (рис. 2б). Значение  $N^*$  выведено в первой строке. Ниже расположено поле *Number of x-grid nodes N*, в котором тоже стоит значение  $N^*$ , поскольку, по умолчанию, поднят флаг *Always set N = N\**. Если растянуть окно Редактора по горизонтали, значение  $N^*$  увеличится и наоборот. Если флаг не установлен, содержимое поля  $N$  не зависит от ширины окна и выбирается из интервала  $[20, N^*]$ . Щелчок по кнопке *Accept N* (принять  $N$ ) выводит планшет с кривой в окно Редактора.

Рабочее поле планшета воспроизводит область возмущения решетки (рис. 2). Под планшетом выводится справочная информация, в частности величины шагов сетки и разрешений. На статусной панели можно прочитать номер вертикали (точки кривой) под курсором и ее координаты. Кнопка *Insert* завершает редактирование: окно Редактора закрывается, происходит перестройка решетки в пределах области возмущения, кривая становится h-линией обновленной решетки.

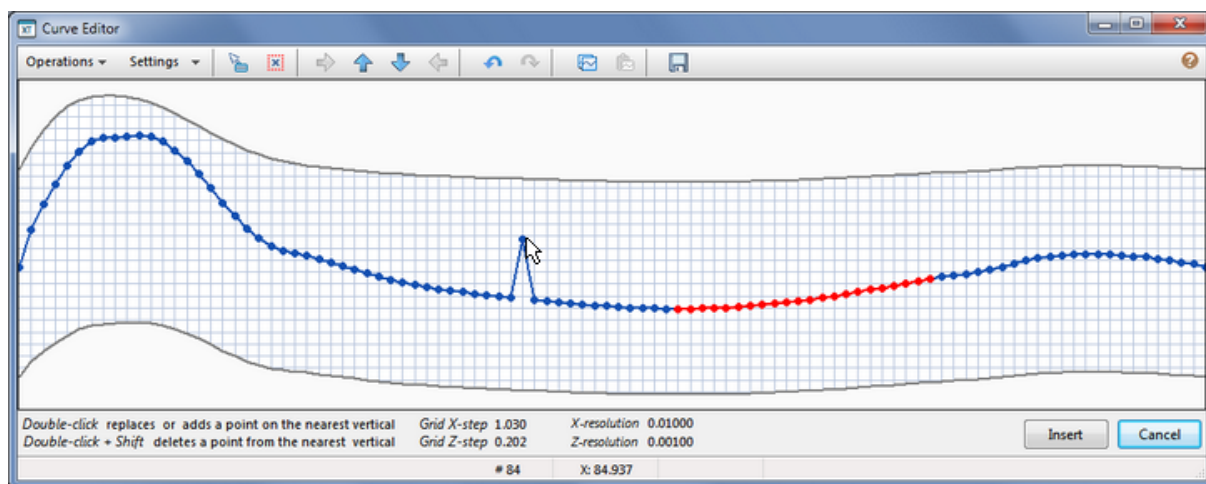


Рис. 2. Окно редактора кривых.

### Поточечное редактирование

Поточечные операции позволяют изменять индивидуальные точки кривой. Двойной щелчок по планшету вблизи вертикальной линии сетки помещает на эту линию новую точку с координатой  $Z$ , соответствующей положению курсора в момент щелчка (рис. 2). Старая точка, если она была, стирается. Двойной щелчок по планшету при нажатой клавише Shift удаляет точку с ближайшей вертикали. Удобно выводить координаты курсора в окно подсказки. Режим вывода включается кнопкой панели инструментов.

Вместо того, чтобы редактировать каждую точку можно нарисовать часть кривой (или *сегмент*) заново несколькими двойными щелчками. Для этого сегмент кривой выделяется резиновым контуром, в меню которого всего одна команда: *Set Segment*. Сегмент выделяется цветом (рис.2). Теперь удалите все точки сегмента командой *Discard* выпадающего меню *Operations*. Сегмент превратится в прямолинейный отрезок. Теперь набросайте форму отрезка двойными щелчками в нескольких характерных точках. После этого выполните интерполяцию, линейную или сплайновую, командой *Operations|Interpolate*. Так можно нарисовать и всю кривую. Команда *Discard* при отсутствии выделенного сегмента удаляет все точки кривой, кроме крайних. Команды *Unselect Segment* и *Discard Segment* помещены также в контекстное меню плоттера.

При редактировании точек кривой Редактор блокирует попытки приблизиться к границе GPA ближе, чем на двойное  $z$ -разрешение.

### Перечень команд редактирования

Команды Редактора подаются либо кнопками инструментальной панели, либо выбором пунктов выпадающих меню.

Таблица 1. Кнопки панели инструментов Редактора кривых

Кнопка	Действие
	Включает/выключает режим вывода окна подсказки с координатами под курсором.
	Аннулирует сегмент (снимает выделение). Продублирована в контекстном меню плоттера.
	Применима только ко всей кривой. Сдвигает кривую вправо на шаг сетки. Крайняя правая точка пропадает. Крайняя левая дублирует прежнюю.
	Сдвигает кривую влево. Действует аналогично предыдущей команде.






	Сдвигает кривую или сегмент (если выделен) вверх на величину, заданную в настройках. Блокируется при приближении к верхней границе GРА.
	Сдвигает кривую или сегмент вниз. Действует аналогично предыдущей команде с заменой направления.
	Кнопки "Назад" и "Вперед"; отменяют или возвращают предыдущее изменение кривой. Действуют рекурсивно.

Таблица 2. Команды меню *Operations*.

Команда	Действие
<i>Discard</i>	Если выделен сегмент, удаляет точки сегмента, иначе удаляет точки кривой. Крайние точки кривой не удаляются. Продублирована в контекстном меню плоттера.
<i>Interpolate Linear</i>	Восстанавливает отсутствующие точки сегмента (если выделен) или всей кривой путем линейной интерполяции.
<i>Interpolate Spline</i>	Восстанавливает отсутствующие точки сегмента (если выделен) или всей кривой путем интерполяции кубическим сплайном. При очень большом числе узлов решетки может потребовать применять по сегментам.
<i>Approximate Polynomial</i>	Выполняет аппроксимацию кривой полиномом, степень которого задана в настройках Редактора.
<i>Approximate Spline</i>	Выполняет аппроксимацию кривой кубическим сплайном с равноотстоящими сопряжениями, число которых задано в настройках Редактора.
<i>Smooth</i>	Сглаживает сегмент (если выделен) или всю кривую методами скользящего среднего или скользящей медианы. Второй метод лучше справляется с отскакивающими точками. Радиусы усреднения каждого метода берутся из настроек Редактора.

### Настройки Редактора кривых

Выпадающее меню *Settings* содержит две команды: *Operation Parameters* и *Drawing Attributes*. Вторая дает возможность изменить цвет и размер точек кривой, цвета сетки и резинового контура. Изменения реализуются с помощью обычного для XТото-LM интерфейса. Первая команда содержит параметры команд меню *Operations*. В Таблице 3 дан перечень этих параметров с комментариями.

Таблица 3. Параметры операций

Параметр	Описание
<i>Horizontal Shift</i>	Величина сдвига задается числом шагов x-сетки. По умолчанию, сдвиг равен одному шагу.
<i>Vertical Shift</i>	Величина сдвига задается в процентах к шагу z-сетки. Размер шага указан под планшетом. Фактическое значение сдвига выводится над полем <i>Percent...</i>
<i>Polynomial approximation</i>	Операция состоит в аппроксимации кривой многочленом Чебышева. Параметр означает степень многочлена в пределах от 1 до 25.
<i>Spline approximation</i>	Операция заключается в аппроксимации кривой кубическим сплайном с равноотстоящими узлами сопряжения ( <i>nodes</i> ). Параметр – число узлов сплайна в

	пределах от 3 до 27.
<i>Smoothing by moving average or median.</i>	Значение Z сглаженной кривой в точке X рассчитывается как среднее или медиана значений Z исходной кривой в $2R + 1$ соседних точках, расположенных симметрично относительно X. Число R называется <i>полушириной окна усреднения</i> . Оно определяет степень сглаживания и является параметром операций.

Все настройки Редактора кривых сохраняются между сеансами работы MED.

## 4 Изменение геометрии решетки

### Перечень операций

Таблица 1. Команды редактирования геометрии решетки

Команда	Меню	Назначение
<i>Create Inner H-Line</i>	Edit	Создает новую h-линию заданной формы, не являющуюся верхней границей модели.
<i>Import Inner H-Line</i>	Edit	Импортирует h-линию из файла формата MG.
<i>Create Top Line</i>	Edit	Создает кривую, которая затем становится верхней границей модели. Команда доступна только в начале обработки.
<i>Import Top Line</i>	Edit	Импортирует кривую из файла формата MG, которая становится верхней границей модели. Команда доступна только в начале обработки.
<i>Edit Top Line</i>	Edit	Позволяет отредактировать верхнюю границу модели.
<i>Move H-Line or Horizon</i>	меню планшета	Операция относится к кровле выделенного ряда. Она сдвигается вертикально вверх или вниз. H-линия может быть горизонтом. <a href="#">Подробнее</a> .
<i>Edit H-Line (not Horizon)</i>	меню планшета	Операция относится к кровле выделенного ряда. В момент вызова h-линия не должна быть сейсмическим горизонтом. Команда используется для изменения формы линии.
<i>Seismic Horizon / Edit</i>	меню планшета	Команда доступна, если в решетке выделен ряд, кровля которого является горизонтом. Команда используется для изменения формы горизонта.
<i>Seismic Horizon / New</i>	меню планшета	Команда доступна, если в решетке выделен ряд. Кровля этого ряда становится горизонтом. Пользователь должен указать, одну волну, образовавшуюся на этом горизонте.
<i>Seismic Horizon / Delete</i>	меню планшета	Команда доступна, если в решетке выделен ряд, кровля которого является горизонтом. Удаляет горизонт из списка горизонтов, превращает его в обычную h-линию решетки.

### Комментарий

Последние две команды работают не с решеткой, а со списком горизонтов. Они не нуждаются в пояснениях. Все остальные команды изменяют форму или положение h-линий решетки. Перед началом операции следует задать область возмущения решетки (**GPA**), внутри которой нет горизонтов (кроме команды *Seismic Horizon | Edit*).

Команды типа *Edit* вызывают Редактор кривой, в который помещается выделенная линия. Команды типа *Create* вызывают Редактор кривых, в который помещается прямая – в качестве начальной кривой для редактирования. Задача пользователя – отредактировать кривую.

Команды типа *Import* требуют задания файла MG (Model Geometry). Для этого выводится диалог *Curve Import* (рис. 1а), в котором следует найти и выбрать файл, а после этого указать номер кривой в файле, выбрав его из выпадающего списка. Кривая должна целиком и с запасом содержаться внутри GPA, иначе импорт блокируется. Кривая может быть задана на любом интервале абсцисс. При встраивании в решетку она либо обрезается, либо экстраполируется (продолжается как горизонталь).

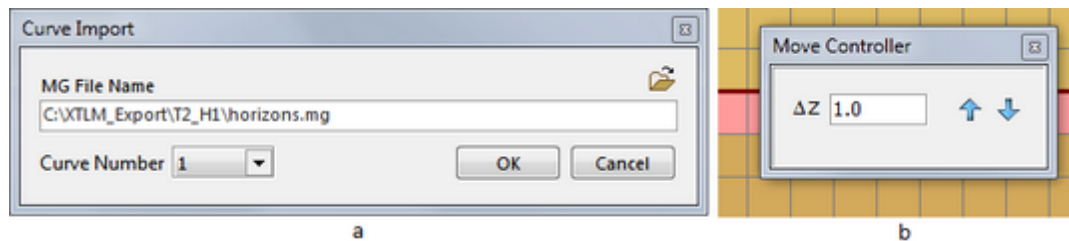


Рис. 1. Изменение геометрии сетки. а – диалог импорта h-линии; б – контроллер сдвига h-линии.

### Перемещение h-линии

Речь идет об операции *Move H-Line or Horizon*. Она не меняет форму, а перемещает кривую вертикально как целое. Команда полезна при подборе положения горизонта. Команда вызывает диалог *Move Controller* (рис. 1б). В поле  $\Delta Z$  задается шаг перемещения. При каждом щелчке по стрелке горизонт сдвигается на величину шага. Если величина сдвига известна заранее, ее можно сразу ввести в поле редактирования, и тогда достаточно одного щелчка по стрелке. Число h-линий в GPA сверху и снизу от перемещаемой кривой не меняется. При перемещении вверх решетка над кривой сжимается, под кривой – расширяется. Так происходит до тех пор, пока не возникнет ошибка разрешения. Когда кривая установлена в нужное положение, следует просто закрыть диалог. Отмена перемещения (по шагам) осуществляется кнопкой отката.

### Изменение геометрии решетки и скорость

Все операции изменения геометрии решетки реализованы так, что оставляют скорость привязанной к узлам решетки, а не к координатам. Такое решение иногда удобно, иногда – нет. Если после изменения геометрии требуется восстановить зависимость  $V(x, z)$ , можно использовать команду меню *Edit|Replace velocity*, которая обсуждается в следующем разделе.

## 5 Редактирование скорости

### Диалог *Editing Velocity*

Большинство операций изменения скорости выполняется в диалоге *Editing Velocity*. Изменения скорости относятся к выделенной подобласти решетки. После выделения области в контекстном меню планшета по-

является команда *Edit Velocity*. Она и вызывает диалог. В момент вывода на экран он показывает единственную вкладку с перечислением вариантов редактирования (рис. 1а). Доступность перечисленных операций зависит от типа выделенной подобласти. После выбора варианта открывается вторая вкладка с деталями операции (рис. 1б). Там пользователь уточняет задачу путем выбора нужной опции или ввода информации. После щелчка по кнопке ОК операция выполняется. Измененные значения скорости не должны выходить за границы спектра. Если это происходит, значение корректируется без извещения пользователя.

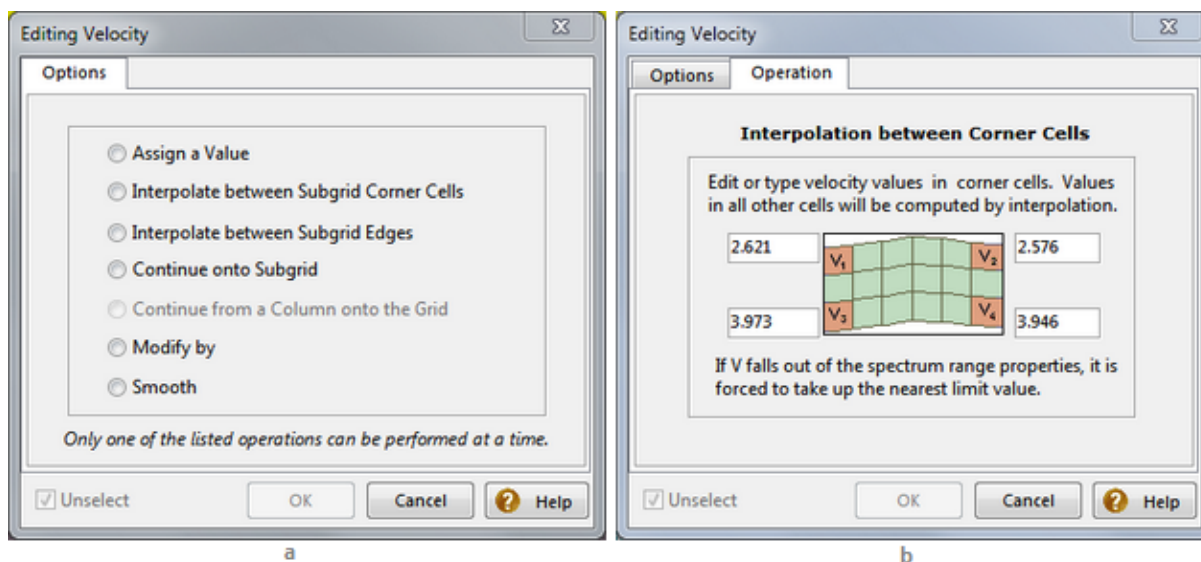


Рис. 1. Диалог редактирования скорости. а – вкладка 1: список операций; б – задание на операцию.

### Описание операций

Комментированный перечень операций представлен в таблице 1.

Таблица 1. Операции редактирования скорости в диалоге *Editing Velocity*

Операция	Описание
<i>Assign a Value</i>	Присвоить значение. Во всех выделенных ячейках значение скорости полагается равным значению, введенному в поле редактирования. Присвоение значение можно выполнить и без диалога. На изображении цветового спектра скорости поместите курсор на нужное значение скорости (значения скорости выводятся в окне подсказки), щелкните правой кнопкой и в контекстном меню спектра выберите команду <i>Assign to Selected</i> . Вместо вызова меню можно выполнить двойной щелчок.
<i>Interpolate between Subgrid Corner Cells</i>	Интерполяция между угловыми ячейками. Пользователь вводит скорость в поля, соответствующие угловым ячейкам области. Скорость в остальных ячейках рассчитывается посредством линейной интерполяции четырех значений.
<i>Interpolate between Subgrid Edges</i>	Интерполяция между крайними колонками или рядами. Опция выбирается из выпадающего списка. Если выбрана интерполяция между колонками, значения скорости $V$ в остальных ячейках рассчитывается путем линейной интерполяции значений в концевых ячейках каждого ряда. Во втором случае $V$ рассчитывается путем интерполяции между крайними ячейками колонки.
<i>Continue onto Subgrid</i>	Продолжение скорости с границы области внутрь. Пользователь выбирает один из 4 вариантов. Вариант определяется выбором граничного столбца или ряда. Например, если выбрана самая левая (leftmost) колонка, скорость в

	ячейке вне этой колонки будет равна ее значению в самой левой ячейке того же ряда. Если выбран верхний (top) ряд, скорость в ячейке вне этого ряда будет равна ее значению в самой верхней ячейке той же колонки. Варианты выбираются из выпадающего списка.
<i>Continue from a Column onto the Grid</i>	Продолжение скорости с колонки на всю решетку. Опция доступна, только если выделена одна колонка. Вариант продолжения определяется направлением от выделенного столбца: влево, вправо, всюду. Вертикальный профиль скорости в любой колонке слева, справа или всюду становится таким же, как в выделенном столбце. Варианты выбираются из выпадающего списка.
<i>Modify by</i>	Изменить скорость на... . Можно выбрать <i>абсолютное</i> или <i>относительное</i> изменение. В первом случае введенная в поле редактирования поправка добавляется к значению скорости в ячейках выделенной области. Во втором случае значение в поле редактирования понимается как <i>число процентов</i> , на которое надлежит изменить скорость в ячейках области. Вариант выбирается с помощью радио-кнопок.
<i>Smooth</i>	Сглаживание. Сглаженная методом скользящего среднего скорость имеет в ячейке (col, row) выделенной области значение, равно среднему значений исходной скорости в ячейках (k, j), где k пробегает множество [col - Rx, col + Rx], а j – интервал [row - Rz, row + Rz]. Параметры Rx и Rz, определяющие степень сглаживания, задаются пользователем. Если выделен ряд, доступно также сглаживание скользящими медианами – для устранения не имеющих физического и геологического смысла горизонтальных осцилляций скорости.

### Импорт скоростной колонки

Наряду с экспортом скоростных колонок модели, унаследованных от модуля Model Viewer, редактор модели позволяет импортировать (первую) скоростную колонку из файла формата VC и заменить ею выделенный в решетке столбец. При этом скоростная колонка  $V(z)$  в файле может быть задана на любой z-сетке. Если импортируемая колонка длиннее колонки модели, она обрезается, если – короче, экстраполируется как постоянная. Если одна или несколько скоростных колонок импортированы в решетку, можно распространить скорость на всю решетку, используя операции из таблицы 1. Для импорта выделите нужную колонку и подайте команду *Import Velocity Column* контекстного меню планшета. Она открывает файловый диалог Windows для выбора VC-файла. Такой файл может содержать любое число колонок, но импортирована будет первая.

### Замена скорости в модели

При изменении геометрии часто возникает необходимость восстановить исходную зависимость  $V(x, z)$ . Об этом говорилось в предыдущем [разделе](#). Это только одно из применений общей операции замещения скорости в модели, которая запускается командой главного меню *Edit/Replace Velocity*. Операция заменяет скорость в текущей модели скоростью из другого m-узла проекта, если только набор вертикалей решетки в обоих моделях совпадает. Таким образом, текущая модель-источник могут отличаться только конфигурацией и числом h-линий. Скорость из модели-источника пересчитывается на новую решетку путем линейного интерполирования на каждой вертикали. В диалоге, который вызывает команда, пользователь должен выбрать модель-источник из выпадающего списка m-узлов (текущий узел в список не входит) и щелкнуть по кнопке *Replace*.

## Представление наблюдений

### 1 Обзор

В данном [цикле обработки](#) работа с системой наблюдений начинается после редактирования модели. Если модель хранится в узле Model N Дерева обработки, то, прежде всего, создается дочерний узел Observations 1. Для этого в Менеджере проектов выделяем узел Model N в Дереве и подаем команду *Processing Tree| Create O-Node*. В этом узле создается первый вариант системы наблюдений. При необходимости можно создать другие дочерние о-узлы со своими вариантами системы наблюдений.

#### Система наблюдений

Термин *система наблюдений* (в пользовательском интерфейсе – *spread*) обозначает хранилище данных, в котором собраны сведения об источниках, приемниках и лучах, относящиеся к полевым наблюдениям (I-проект) или задаче моделирования (M-проект). Каждый источник (приемник) задается номером (идентификатором, ID) и координатами точки постановки. Конечно, лучи не относятся ни к наблюдаемым данным, ни к условиям моделирования. Лучи – это промежуточный или окончательный результат обработки. Тем не менее, удобно использовать термин "луч" уже на этой стадии вместо выражения "пара источник-приемник". Последнее тоже нуждается в уточнении. Ведь не каждая пара источник-приемник в данной расстановке порождает сейсмическую трассу с полезной информацией, т.е. *наблюдение*. Перечисление "состоявшихся" наблюдений это и есть входные SRT-данные для проекта обращения. И каждая строка в файле формата SRT дает описание луча, который будет трассирован при решении прямой задачи. Точно так же в задаче моделирования не всегда требуется трассировать лучи для всех пар источник-приемник. Например, при моделировании головной волны не нужны наблюдения вблизи источника. В указанном смысле термин "луч" используется для описания входных данных.

#### Каталог лучей

В XTomo-LM система наблюдений хранится в базе данных, называемой *Каталог лучей* (Ray Catalog). Название понятно в свете замечаний в предыдущем пункте. В I-проектах он формируется в результате импорта файла SRT и не подлежит изменению. В M-проекте Каталог лучей создается в два приема. Сначала определяются наборы источников и приемников. Это можно сделать либо в графическом модуле *Spread Editor*, либо путем импорта из ASCII файлов. В любом случае XTomo-LM создает *полный* Каталог лучей (Default Ray Catalog), перечисляя в нем все возможные пары источник-приемник. Затем, если нужно, пользователь может удалить часть лучей в модуле *Ray Catalog Editor*.

Каталог лучей первоначально создается в папке узла Observations Дерева обработки. После каждого решения прямой задачи создается своя версия Каталога в новом f-узле. В нее записываются рассчитанные времена пробега и ссылки на лучевые пути, хранящиеся в особом файле. Число лучей в этой версии Каталога может быть меньше, чем в исходной.

#### Порядок изложения

Хотя графы обработки в I- и M-проектах различны, описывать программные средства удобнее по функциональному принципу. Принимается следующая последовательность изложения (в скобках указаны типы проектов, к которым относится тема):

- средства просмотра Каталога лучей (I, M);
- импорт данных (I, M);
- создание систем наблюдений (M);
- редактирование Каталога лучей (M).

## 2 Просмотр системы наблюдений

В этом разделе предполагается, что Каталог лучей уже сформирован в папке о-узла Дерева обработки. В контекстном меню, если вызвать его на этом узле, в I-проекте активна команда *View Observations..*, а в M-проекте – *View Spread....* Каждая из них раскрывает подменю с командами, реализующими способы просмотра Каталога.

Таблица 1. Команды просмотра Каталога лучей

Команда	Проект	Назначение
<i>On Model Image</i>	I, M	Запускает графический модуль просмотра наборов источников и приемников на изображении модели (Spread Viewer).
<i>AS Ray Catalog Database</i>	I, M	Запускает модуль просмотра Каталога лучей в виде иерархии числовых таблиц (Ray Catalog Viewer).
<i>As TX-Curve Set</i>	I, профиль	Доступна только в случае профильных наблюдений. Вызывает (графический) модуль просмотра Каталога в виде набора систем годографов волн (TX-Curve Viewer).

### Модуль Spread Viewer

Этот графический модуль позволяет просмотреть наборы источников и приемников на изображении модели. Источник изображается треугольником, стоящим на вершине, приемник – треугольником, стоящим на основании. Точка постановки источника указана вершиной треугольника, точка постановки приемника – середина основания. Форму символов изменить нельзя, но цвет и размеры – можно. Для этого в меню *Properties* следует выбрать команду *Spread Drawing Attributes*. Она выведет диалог, показанный на рис. 1b. Он напоминает окно [Менеджера волн](#) не только видом, но и приемами работы. На правой панели можно изменить размер и цвет символа, наличие и цвет бордюра. В пользовательском интерфейсе иконка с изображением источника является метафорой системы наблюдений.

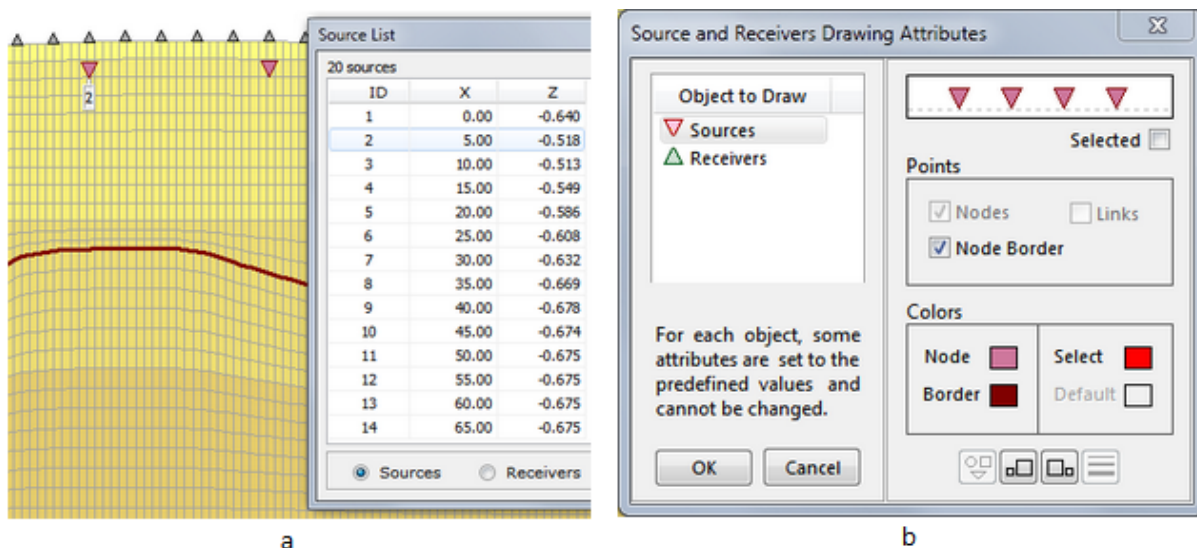


Рис. 1. Модуль Spread Viewer. а – список источников/приемников; б – атрибуты рисовки.

На рис. 1а приемники и источники располагаются вдоль линии наблюдения, источники заглублены. Это типичная ситуация. Но со стороны XTomo-LM никаких ограничений на расположение источников и приемников нет. В М-проекте пользователь может располагать их где угодно, кроме левой колонки и последнего ряда решетки. Команда *View/Source/Receiver List* выводит окно с перечнем источников или приемников в виде таблицы "ID – X – Z". Она связана с изображением так, что источник (приемник), выделенный в таблице, получает на изображении ярлычок со значением ID. На рисунке ID = 2. Модуль *Spread Viewer* не дает информации о множестве лучей.

### Модуль Ray Catalog Viewer

Модуль RCV представляет информацию в Каталоге лучей в виде набора таблиц. На рис. 2 модуль вызван на о-узле I-проекта.



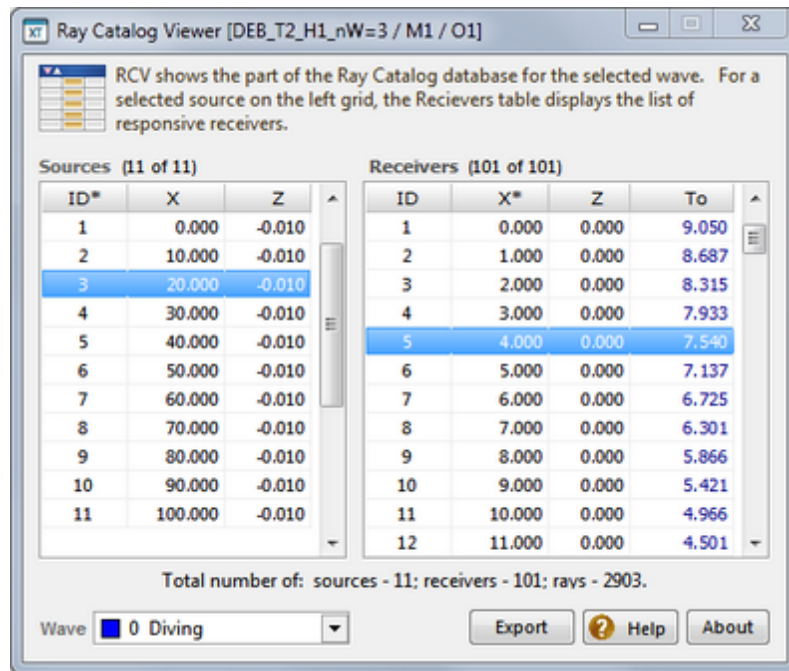


Рис. 2. Главное окно модуля Ray Catalog Viewer.

Иерархия таблиц управляется выбором волны из выпадающего списка. Таблица *Sources* показывает список всех источников, порождающих наблюдения выбранной волны. Для источника, выделенного в этом списке, таблица *Receivers* показывает список всех приемников, зарегистрировавших от него полезный сигнал, а значит, – список лучей, исходящих из этого источника. *To* – стандартное обозначение для *наблюденных* (observed) времен. Звездочка у имени колонки в таблицах указывает ключ сортировки.

При выделении другого источника в *Sources* таблица *Receivers* заполняется новой порцией данных. При выборе другой волны обновится таблица *Sources*. Обновления часто не заметны, поскольку множество приемников не меняется при переходе к другому источнику, а множество источников – при переключении волны.

В случае М-проекта колонка *To* в таблице *Receivers* отсутствует. Отсутствует и список волн, поскольку волны связываются с системой наблюдения только в задании на решение прямой задачи.

Модуль RCV можно запустить и на f-узле (та же команда), т.е. после решения прямой задачи. При этом таблица *Receivers* приобретает новый столбец *Tc* – *расчетные времена* (computed times), а в случае I-проекта – еще и колонки *Ea* (абсолютные невязки, absolute errors, absolute residuals) и *Er* (относительные невязки, relative errors or residuals). Обозначения *Tc*, *Ea* и *Er* всегда имеют указанный смысл в пользовательском интерфейсе XTomо-LM.

Кнопка *Export* выводит диалог для экспорта содержимого Каталога лучей в ASCII файлы. Пользователь выбирает формат выходного файла и опции вывода (все волны или только выбранная в списке). Предлагается три формата: **SRT**, **SR** и *All columns*. Выбрать SRT на о-узле можно только в I-проекте. Выводиться будет файл, эквивалентный входному файлу SRT. На f-узле выбрать SRT можно и в М-проекте, причем в качестве наблюдаемого времени будет выводиться *расчетное время Tc*. Формат "All Columns" предусматривает вывод всех колонок обеих таблиц в обычный текстовый файл (TXT).

### Модуль TX-Curve Viewer

В I-проекте SRT-данные профильных наблюдений можно рассматривать как набор годографов общего

пункта возбуждения (ОПВ). В XTomo-LM *годографом* считается множество наблюдений ОПВ одной волны с одной стороны от источника. Наблюдения справа образуют *прямой* (direct, normal) *годограф*, наблюдения слева – *встречный* (reversed) *годограф*. Разбиение на прямые и встречные *годографы* важно для изучения головных волн. Таким образом, для данной волны каждому источнику в системе наблюдений может отвечать один *годограф* (прямой или встречный), оба *годографа* или ни одного. Совокупность *годографов* от всех источников составляет *систему годографов волны* (wave TX-curve set).

Модуль TX-Curve Viewer изображает содержимое Каталога лучей в виде набора систем *годографов* волн. Каждая точка *годографа* отвечает лучу, так что такое представление адекватно содержимому Каталога. Главное окно модуля показано на рис. 1а. Оно содержит три секции: Source List (Список источников), Wave List (Список волн) и планшет (X,T), изображающий *годографы* с атрибутами рисовки, заданными в списке волн проекта. При запуске на планшете изображаются все *годографы* ОПВ. Пунктирными линиями показаны вертикали, проходящие через точки расположения источников.

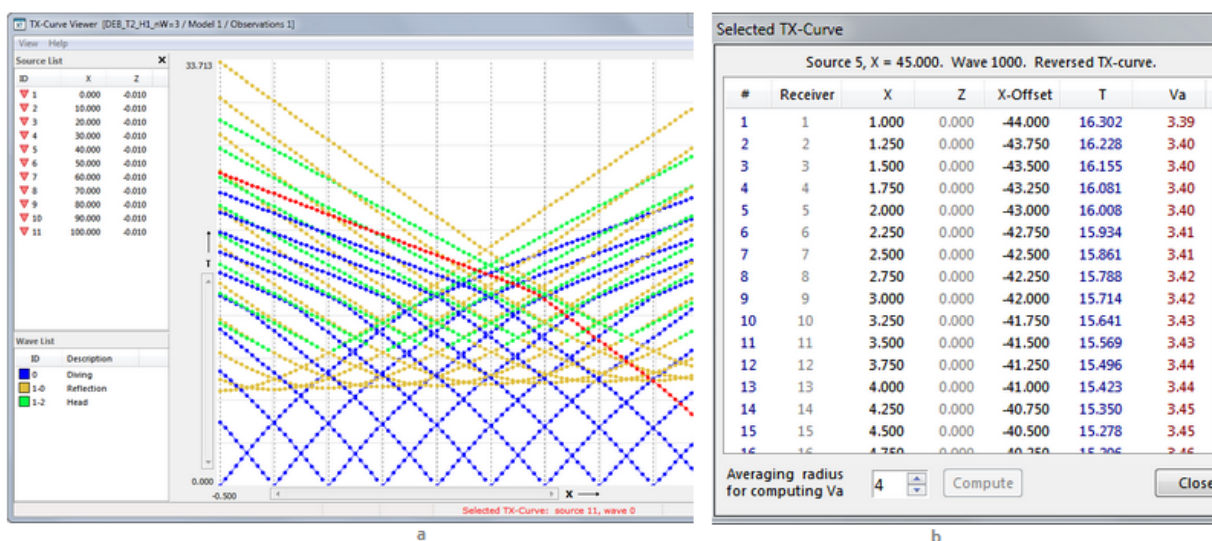
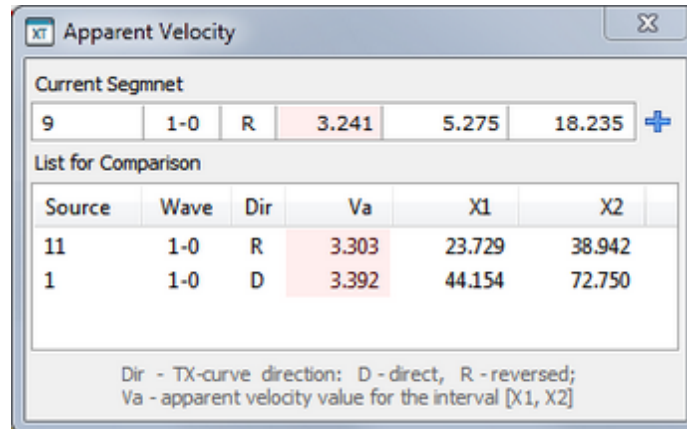


Рис. 3. Модуль TX-Curve Viewer. а – главное окно, выделенный *годограф*; б – таблица выделенного *годографа*.

Планшет устроен как у графического модуля. Он имеет лупу и селектор *годографа*. Резиновый контур селектора должен содержать, по крайней мере, две точки *годографа* с разными абсциссами, иначе он не рисуется. Среди всех точек, попавших внутрь резинового контура, выбирается ближайшая к левому ребру контура, а если таких точек несколько, – та, что ближе всех к верхнему ребру. Выделяется тот *годограф*, которому принадлежит эта точка. Если таких *годографов* более одного, выбирается тот, что относится к источнику с меньшим ID. Выбранный *годограф* окрашивается цветом выделения, заданным в Менеджере волн. Если положение источника и приемника совпадают, соответствующая точка *годографа* всегда присоединяется к выделенному *годографу*.

Выделенный *годограф* можно вывести в виде таблицы (рис. 3б) командой меню планшета *Selected TX-Curve*. Помимо номеров приемников и их координат, выводится кажущаяся скорость. Как обычно, при дифференцировании шумовых данных используется локальная аппроксимация линейной функцией в окрестности данной точки  $x$ . Величина этой окрестности управляется параметром *Averaging radius*. Его значение выводится в поле под таблицей. Можно перевычислить кажущуюся скорость при другом значении параметра (кнопка *Compute*).

Сравнение кажущихся скоростей важно для анализа систем *годографов* головных волн. Пользователь может вычислить кажущуюся скорость  $V_a$  для любого сегмента *выделенного годографа* и сохранить ее для сравнения. Сегмент выделяется резиновым контуром (имеет значение только  $x$ -интервал контура), в рк-меню выбирается команда *Apparent Velocity for Segment*.



Current Segment					
9	1-0	R	3.241	5.275	18.235

List for Comparison					
Source	Wave	Dir	Va	X1	X2
11	1-0	R	3.303	23.729	38.942
1	1-0	D	3.392	44.154	72.750

Dir - TX-curve direction: D - direct, R - reversed;  
Va - apparent velocity value for the interval [X1, X2]

Рис. 4. Сравнение кажущихся скоростей.

Она вызывает диалог *Apparent Velocity* (рис. 4). В строке *Current Segment* выводится информация о сегменте. Поля строки имеют тот же смысл, что колонки у расположенной ниже таблицы: ID источника, направление годографа (D – прямой, direct, R – встречный);  $V_a$ ; диапазон изменения абсциссы. Строка может быть скопирована в таблицу кнопкой "плюс" и таким образом сохранена до конца сеанса работы модуля. Скорость определяется по наклону прямой, аппроксимирующей весь сегмент. Меню таблицы позволяет отсортировать строки по волне или источнику и удалить лишние,

Списки источников и волн реализуют механизм фильтрации данных, полезный, когда данных много. Фильтр управляется контекстными меню списков *Source List* и *Wave List*. Оба списка допускают множественное выделение строк. В меню находятся команды типа *Show Selected* (Показать выделенные), *Show Only Selected* (Показать только выделенные), *Hide Selected* (Скрыть выделенные), и т.д., которые позволяют создать нужную выборку годографов и вывести ее на планшет.

## 3 Импорт системы наблюдений

### Импорт SRT-данных в I-проекте

Входные данные I-проекта хранятся в файле типа [SRT](#). Для ввода файла в систему вызываем меню Древа обработки на узле *Observations* и выбираем команду *Import SRT Data*. Главное окно модуля *SRT Data Importer* показано на рис. 1а.

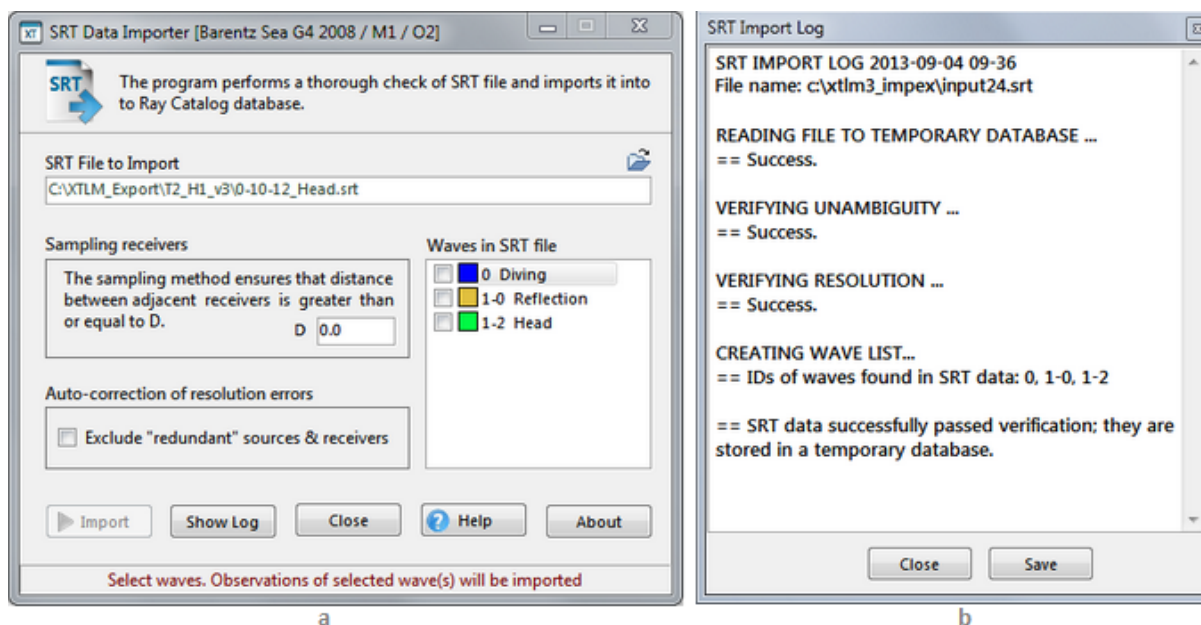


Рис. 1. Модуль SRT Data Importer. a – главное окно; b – протокол импорта.

Вся операция выполняется в два этапа: проверка (verification) файла SRT и, собственно, импорт. Выбираем входной файл, пользуясь кнопкой справа от поля *SRT File to Import*; затем нажимаем кнопку *Import*. На экране появляется окно протокола (рис. 1b), в которое выводятся результаты анализа файла, в частности, сообщения об ошибках. Протокол можно отодвинуть в сторону, а не закрывать: он пополняется на этапе импорта. Содержимое протокола можно сохранить в пользовательский файл (кнопка *Save*).

В ходе проверки выявляются ошибки формата (format errors), нарушения однозначности (unambiguity errors) и ошибки разрешения (resolution errors). Ошибки формата – это нечисловые данные, пропуски чисел, аномальные значения, неверные коды волн, точки постановки за пределами модели. При обнаружении такой ошибки чтение файла прекращается, в протоколе указывается номер ошибочной строки файла.

Нарушения однозначности вызываются:

- наличием одинаковых пар источник-приемник для одной волны;
- наличием строк с одинаковым ID, но разными координатами у источника или приемника

Ошибки разрешения – это слишком близкое расположение источников и приемников (см. [Разрешение](#)). Если перед проверкой поднять флаг авто-коррекции, то источники или приемники, вызывающие ошибку разрешения, будут исключены из импорта.

Если ошибок не обнаружено, введенные данные помещаются во временное хранилище, а в главном окне выводится список волн для импорта. Волна включается в список импорта, если ее код имеется в файле SRT и в списке волн проекта. Кроме того, если это отраженная или головная волна, то горизонт с соответствующим кодом должен входить в список горизонтов модели. Информация о волнах, не включенных в список импорта, помещается в протокол. На этом первый этап завершается.

Перед началом второго этапа пользователь имеет возможность выбрать данные для импорта. В списке волн следует поднять флажки у нужных волн. Если необходимо, можно разрядить лучи, введя минимальное расстояние между приемниками в поле *D*. Значение по умолчанию  $D = 0$ ; это означает импорт всех лучей. Щелчок по кнопке *Import* запускает создание Каталога лучей. Его можно просмотреть, средствами, описанными в предыдущем разделе.

Менеджер проектов разрешает многократный импорт в один и тот же о-узел Древа, если только у него нет потомков.

### Импорт системы наблюдений в М-проекте

Входные данные М-проекта могут храниться либо в файле типа **SR**, который перечисляет пары источник-приемник, подобно SRT, либо в двух файлах типов **S** и **R** одинаковой структуры. В первом файле перечисляются источники, во втором – приемники. В Менеджере проектов в меню Древа обработки выделяем узел *Observations*, вызываем меню и выбираем команду *Import Spread*. В главном окне модуля *Spread Importer* (рис. 2) выбираем формат входного файла с помощью радио-кнопок. Затем выбираем нужный файл в файловом диалоге (кнопка *Browse*) и запускаем операцию (кнопка *Import*).

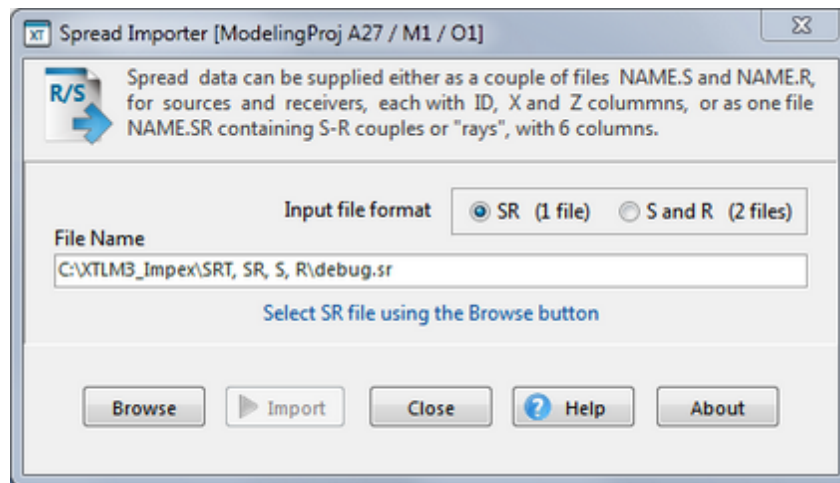


Рис. 2. Главное окно модуля *Spread Importer*.

Модуль осуществляет точно такую же проверку входного файла (входных файлов) как при импорте SRT и выводит информацию в протокол. Если ошибок нет, модуль сразу же создает полный Каталог лучей и заносит в него данные из входных файлов. Операция завершена.

## 4 Система наблюдений в М-проекте

В М-проекте система наблюдений может быть создана (отредактирована) в графическом модуле *Spread Editor*. Команда запуска находится в меню Древа обработки, вызванном на о-узле. Модуль наследует способ представления источников и приемников и всю функциональность программы просмотра [Spread Viewer](#). Команды редактирования помещены в меню резинового контура (рк-меню), контекстное меню планшета и окно списка источников/приемников. Добавление источника/приемника требует определения его ID и координат. Во всех операциях ID создаются автоматически; модуль контролирует ошибки позиционирования и разрешения. Таким образом, целостность данных гарантирована. Запрещено размещать источники и приемники в первой колонке и последнем ряду решетки. *Spread Editor* предоставляет возможность откатить операцию лишь в нескольких случаях.

## Операции и команды

Таблица 1. Операции редактирования модуля Spread Editor

Команда	Место	Описание
<i>Add Source, Receiver</i>	меню планшета	Доступны, если выделена ячейка решетки. Источник/приемник помещается в вершину ячейки. ID создается автоматически.
<i>Add Array</i>	меню планшета	Доступна, если выделен ряд или колонка. Создает расстановку источников/приемников вдоль кровли ряда или левого ребра колонки (см. ниже).
<i>Add Inline Array</i>	рк-меню	Создает линейную расстановку источников/приемников вдоль ребер или диагоналей прямоугольника. <a href="#">Подробнее</a> .
<i>Delete Sources, Receivers or Both</i>	рк-меню	Удаляет источники, или приемники, или и те, и другие внутри резинового контура.
Кнопка <i>Delete</i>	список	Удаляет источники/приемники, отмеченные в в списке.
Кнопка <i>+Move</i> Кнопка <i>-Move</i>	список	Перемещает источники/приемники, отмеченные в списке. <a href="#">Подробнее</a> .

## Создание расстановки вдоль h- или v-линии

Остановимся на случае h-линии. Случай v-линии принципиально не отличается. После выделения ряда в контекстном меню планшета становится доступной команда *Add Array*. Она вызывает диалог (рис. 1), позволяющий создать расстановку (array) равноотстоящих источников или приемников в зависимости от флагов *Array Item*.

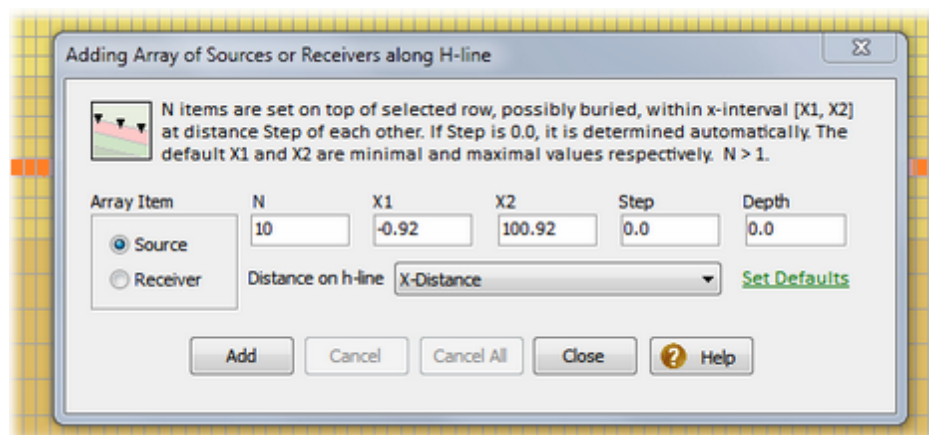


Рис. 1. Диалог создания расстановки вдоль h-линии.

Далее говорим об источниках. Они размещаются вдоль h-линии, которая служит кровлей выделенного ряда. Доступны следующие варианты расстановки.

1. Размещение  $N$  источников в интервале абсцисс  $[X1, X2]$ . Следует задать  $N$ ,  $X1$ ,  $X2$  и положить  $Step = 0$ .
2. Размещение  $N$  источников в интервале абсцисс  $[X1, X2]$  с заданным шагом. Следует задать  $N$ ,  $X1$ ,  $X2$  и  $Step$ .

В случае 1 шаг рассчитывается программой. В случае 2 может быть размещено менее  $N$  источников. Во всех случаях можно определить заглублие *Depth* относительно  $h$ -линии, а также задать способ измерения расстояний между источниками. Он выбирается из выпадающего списка *Distance on h-line*. Под расстоянием можно понимать либо расстояние между проекциями точек на ось  $X$  ( $X$ -Distance), либо расстояние, измеренное вдоль кривой. Различие значимо при достаточно большой кривизне  $h$ -линии.

Щелчок по кнопке *Add* запускает операцию. По завершении сообщается о числе реально добавленных источников. При этом диалог не закрывается. Его следует оттащить в сторону, чтобы посмотреть на результат. Операцию можно отменить щелчком по кнопке *Cancel*. Попытка добавить ту же расстановку, вызовет сообщение о ошибках разрешения. Но можно добавить другую расстановку вдоль той же  $h$ -линии – с другим интервалом  $[X1, X2]$  и/или другим шагом. Кнопка *Cancel All* отменяет все добавления. Кнопка *Close* закрывает диалог.

### Создание линейной расстановки

Эта операция позволяет создать расстановку вдоль прямой линии с любым наклоном. Линия задается как верхнее или левое ребро подходящим образом подобранного прямоугольника, или любая из его диагоналей. Прямоугольник совпадает с резиновым контуром. В рк-меню надо выбрать команду *Add Inline Array*. Команда выводит диалог, показанный на рис. 2а.

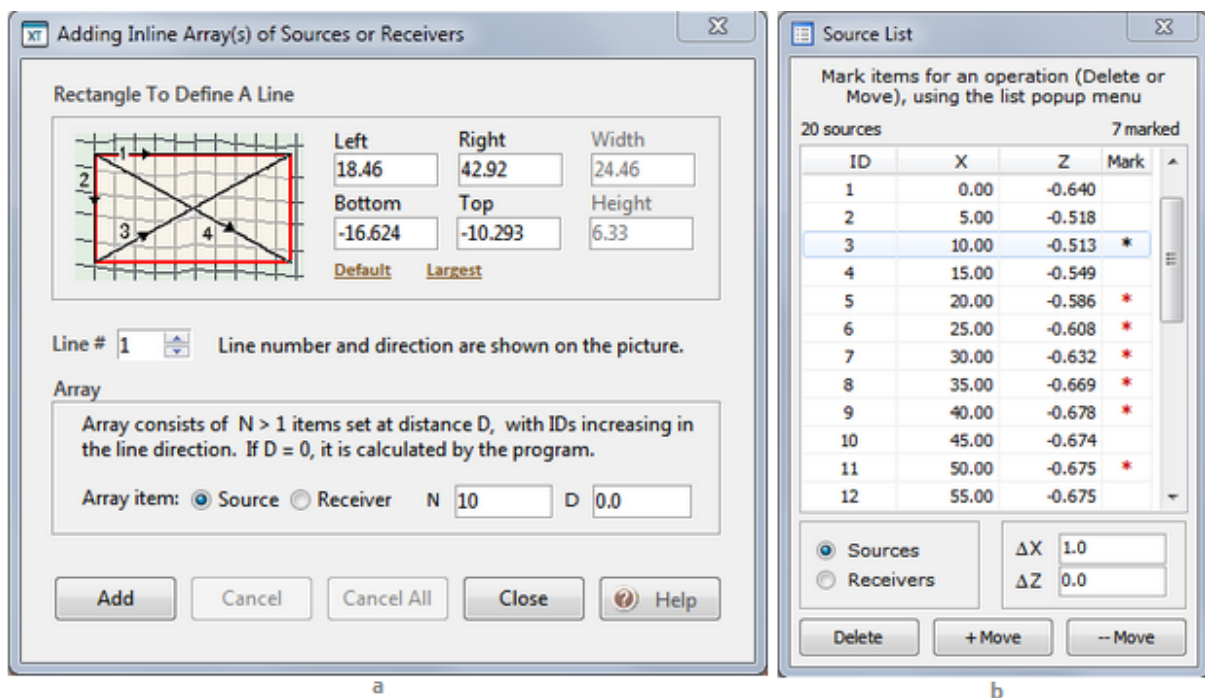


Рис. 2. Редактирование системы наблюдений. а – создание линейной расстановки; б – работа из списка.

Прежде всего, в нем можно скорректировать прямоугольник, а тем самым и положение прямой линии. Для этого используются поля ввода *Left*, *Right*, *Bottom*, *Top*. Ширину (*Width*) и высоту (*Height*) прямоугольника удобно знать для оценки наклона линии. Рисунок на левой панели объясняет, как нумеруются и какова ориентация каждой из четырех прямых, задаваемых прямоугольником. Направление на прямой указывает, в каком порядке нумеруются новые источники (приемники). Номер нужной прямой выбирается в поле *Line*, число источников – в поле *N*, а шаг – в поле *D*. Соглашения об интерпретации программой значений *N* и *D* такие же, как в предыдущем пункте. Щелчок по кнопке *Add* добавляет расстановку, но диалог не закрывается, предоставляя возможность посмотреть на результат, отменить операцию (*Cancel*) или

провести другую операцию добавления. Кнопка *Cancel All* отменяет все добавления.

### Удаление

Предусмотрено два способа удаления объектов системы наблюдений. Первый состоит в захвате объекта (объектов) резиновым контуром и применении команды *Delete* в рк-меню. Она дает возможность указать, что удалять: источники, приемники, или все объекты. Второй способ описан в следующем пункте.

### Работа со списком источников (приемников)

Для определенности речь пойдет об источниках. Список источников в модуле Spread Editor является инструментом редактирования. Он используется для удаления и перемещения произвольных групп источников. Группа задается посредством маркировки. Но в данном случае маркер не цветовой, а звездочка в колонке *Mark* (рис. 2b). Команды выделения помещены в контекстное меню (таблица 2).

Таблица 2. Операции выделения в Списке источников

Команда	Клавиша	Описание
<i>Mark/Unmark</i>	Ctrl+Click	Ставит/снимает отметку выделенной строки списка.
<i>Mark Range</i>	Shift+Click	Отмечает диапазон между выделенной и ранее отмеченной строками.
<i>Mark All</i>	Ctrl+A	Отмечает все строки списка.
<i>Unmark All</i>	Ctrl+U	Снимает все отметки в списке.
<i>Filter Marked</i>	Ctrl+F	Включает/выключает фильтр вывода маркированных строк

Операции над маркированными источниками выполняются после щелчка по кнопкам *Delete* (удалить) или *Move* (переместить). Кнопки *Move* доступны, если хотя бы одно из значения полей  $\Delta X$  и  $\Delta Z$  отличается от 0. В них вводится значение шага перемещения для последовательности сдвигов или полная величина перемещения, если она известна заранее – для однократного сдвига. Программа контролирует ошибки разрешения и выхода за допустимые пределы области, которые могут возникнуть при перемещении. Список источников выводится в окне, которое не является диалоговым, так что главное окно модуля остается доступным. Но все операции редактирования в главном окне запрещены.

### Создание полного Каталога лучей

При попытке выхода из модуля, он сохраняет наборы источников и приемников, но только в том случае, если каждый из наборов не пуст. При этом создается заново полный Каталог лучей, в котором записаны всевозможные пары источник-приемник.

## 5 Каталог лучей в M-проекте

В M-проектах при каждом изменении наборов источников и приемников (посредством импорта или графического редактирования) создается новый Каталог лучей. Он является полным в том смысле, что содержит все пары источник-приемник. Его можно разредить с помощью модуля Ray Catalog Editor (RCE). Команда запуска – *Edit Ray Catalog Database* в меню Дерева обработки на узле Observations. Внешне главное окно модуля не отличается от окна программы просмотра Каталога [Ray Catalog Viewer](#). Представление Каталога лучей в редакторе в точности такое же, как в RCV. Но таблица *Receivers* в нем имеет



контекстное меню. Оно содержит команды удаления приемников (а значит, лучей) по разным критериям. Кроме того, сама таблица *Receivers* допускает множественное выделение. Оно несколько отличается от выделения в списках. Выделение совершается щелчком по строке при утопленной клавише Ctrl. Выделенная строка выводится на синем фоне и помечается жирной точкой на левом поле таблицы, чтобы не путать ее с текущей записью базы данных. Список команд приведен в таблице 1.

Таблица 1. Команды удаления и восстановления

Команда	Описание
<i>Delete Selected Rays</i>	Удаляет из таблицы все выделенные приемники (а значит, и лучи).
<i>Delete on Offset Condition</i>	Удаляет лучи к приемникам, удовлетворяющим заданным условиям на удаления (см. ниже).
<i>Delete Each Second Ray</i>	Удаляет каждый второй приемник, считая с первого.
<i>Delete All Rays for this Source</i>	Удаляет все лучи, порожденные источником, выделенным в таблице <i>Sources</i> .
<i>Recreates Default Ray Catalog</i>	Восстанавливает полный Каталог лучей, измененный при редактировании.

### Удаление лучей по условию на удаления

Команда *Delete on Offset Condition* выводит диалог (рис. 1) для задания условия на удаления.

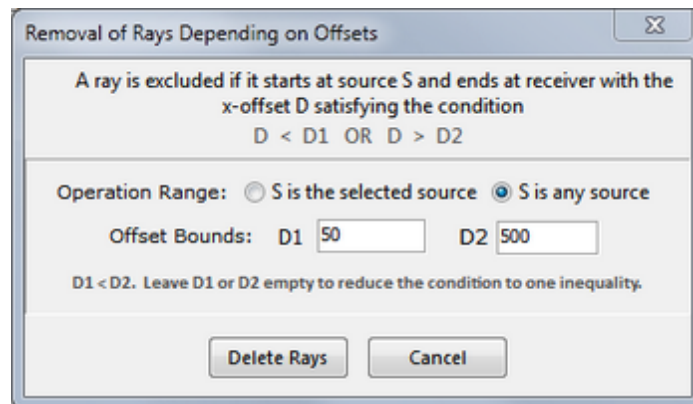


Рис. 1. Диалог формирования условия для удаления лучей.

Условие имеют вид  $D < D1$  или  $D > D2$ , где  $D$  – это  $x$ -удаление, т.е. расстояние между проекциями источника и приемника на ось  $X$ . Значения  $D1$  и  $D2$  вводятся в одноименные поля. Одно из полей можно оставить пустым. Это будет означать отсутствие в условии соответствующего неравенства. Операция может быть применена либо к лучам, отвечающим выделенному в таблице *Sources* источнику (*selected source*), либо к лучам, порожденным всеми источниками (*any source*). Выбор осуществляется щелчком по одной из радиокнопок. Кнопка *Delete Rays* запускает операцию.

**Действия при завершении**

При завершении программа проверяет, не образовались ли после удалений источники и/или приемники, не входящие в список лучей. Если да, они удаляются из Каталога.

# Решение прямой задачи

## 1 Обзор

Решение, просмотр и анализ решения прямой кинематической задачи занимает центральное место в обработке. Решение прямой задачи (трассировка лучей) является конечной целью проектов моделирования и обязательным этапом проектов обращения. Решение прямой задачи является также самой затратной по времени операцией. Именно она определяет адекватность используемой вычислительной системы.

В проектах обоих типов этап решения прямой задачи начинается после формирования системы наблюдений. Входными данными для трассировки лучей являются модель и Каталог лучей. В меню Древа обработки на узле Observations подается команда *Solve Forward Problem*. В Древе создается дочерний узел Forward Problem. Затем запускается модуль Forward Problem Solver (**FPS**), в окне которого пользователь формирует задание, и который после запуска управляет ходом решения. При отказе от решения или при ошибках решения вновь созданный узел Древа удаляется. При успешном завершении в папку этого f-узла помещаются результаты. Они включают обновленную версию Каталога лучей и файл лучевых путей. На новом f-узле запускается модуль Forward Problem Solution Viewer (**FPV**). В нем на фоне модели изображаются трассированные лучи или выборки лучей, наблюдаемые (в I-проектах) и расчетные годографы. С помощью встроенных в него инструментов осуществляется статистический анализ невязок времен, исследуется плотность лучевого покрытия и производится подготовка к решению обратной задачи. Короткие имена модулей FPS и FPV будут использоваться в этой главе без пояснений.

## 2 Модуль Forward Problem Solver

Запускаем FPS на o-узле Древа обработки. Сеанс решения прямой задачи состоит из четырех действий:

- a) подготовка задания (task);
- b) запуск и выполнение (execution);
- c) изучение протокола (log);
- d) сохранение решения в выходной Каталог лучей.

Можно опустить шаг c) и объединить b) и d), если пользователь уверен в успехе. Работа пользователя связана, в основном, с подготовкой задания. Оно включает:

- выборку волн, лучи которых подлежат трассировке – всегда;
- подготовку информации для обменных волн – если они включены в задание;
- изменение точности трассировки (Ray Tracing Precision, RTP) – редко;
- изменение параметров выполнения – иногда.

### Выбор волн

При запуске модуль выводит список волн, для которых имеет смысл решение прямой задачи. В этот список попадают, вообще говоря, не все члены Списка волн проекта. Дополнительные условия для M-проекта: либо волна является проходящей, либо она связана с горизонтом модели. Условия для I-проекта: наблюдения волны имеются в каталоге лучей (т.е. были в файле SRT); если волна является отраженной или головной, она связана с горизонтом модели. Выражение "связана с горизонтом" имеет следующий точ-

ный смысл: ID горизонта в коде волны присутствует в списке горизонтов модели (см. [Волны](#), [Горизонты](#)). На рис. 1 показан фрагмент главного окна со списками волн и горизонтов.

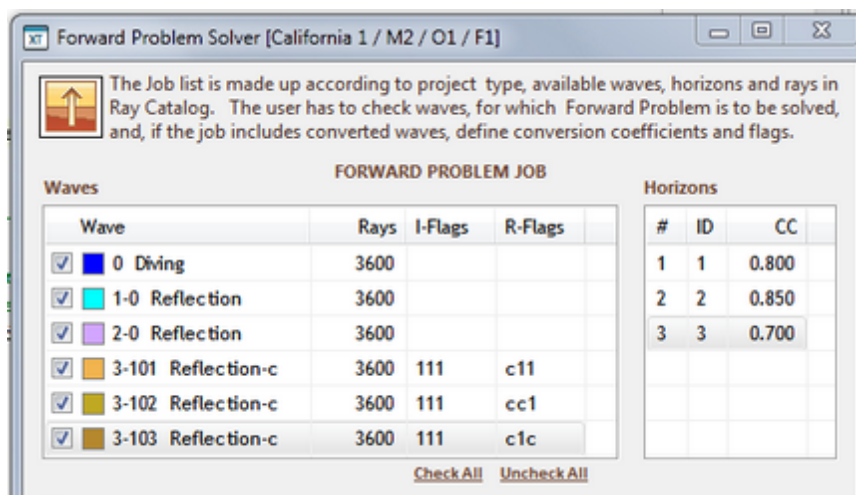


Рис. 1. Задание: списки волн и горизонтов.

В списке волн указано число лучей в Каталоге, а для обменных волн – и флаги конверсии (см. ниже). В списке горизонтов для каждого указан порядковый номер в модели, ID и коэффициент конверсии CC. По умолчанию CC = 1 (нет конверсии). В списке волн у каждой волны стоит галочка. Она означает, что волна включена в задание. Выборка волн составляется снятием галочек. Можно использовать ссылки *Check All* (отметить все) и *Uncheck All* (снять все галочки).

### Подготовка информации для обменных волн

Для каждой обменной волны следует задать флаги конверсии. Каждый флаг относится к одному горизонту модели. Значения флага обозначаются символами "c" и "1". Первый означает "есть конверсия", второй – "нет конверсии". Если имеется N границ, следует задать N флагов. Последовательность флагов составляет строку из указанных символов, например, "11c1c1...1c". Номер символа в строке равен номеру горизонта в модели, считая сверху вниз. Если k-й флаг равен "c", скорость распространения волны в k-м слое равна  $CC_k \cdot V$ , где  $CC_k$  – коэффициент конверсии для k-го горизонта, а V – скорость в модели. Флаги конверсии задаются отдельно для падающей и отраженной волны, так что обменной волне соответствует две строки флагов. Длина строк равна номеру горизонта, на котором образовалась волна. Если какая-то волна испытывает конверсию при переходе через k-й горизонт, коэффициент конверсии для него в списке горизонтов должен быть отличен от 1.

Для редактирования флагов и коэффициентов конверсии следует раскрыть панель *Conversion Specification*, щелкнув по кнопке "+" (рис. 2).

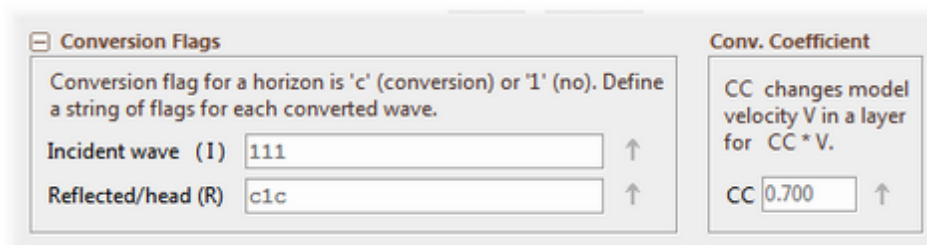



Рис. 2. Задание: флаги и коэффициенты конверсии для обменной волны.

Строки флагов редактируются в полях *Incident wave* (падающая волна) и *Refracted/head wave* (отраженная/головная волна). Поля доступны, только если в списке волн выделена строка с обменной волной. В каждую позицию строки можно вводить только символы флагов. Редактирование завершается щелчком по кнопке . Удобнее всего вести редактирование на клавиатуре, учитывая, что:

- 1) комбинация [Shift + ↓] перемещает фокус из списка волн в поле *Incident wave*;
- 2) комбинация [Shift + ↑] перемещает фокус из любого поля флагов в список;
- 3) клавиша ↑ в поле флагов эквивалентна кнопке ↑.

Подобным же образом редактируются коэффициенты конверсии в списке горизонтов.

### Точность трассировки лучей

Это параметр алгоритма. Изменение значения по умолчанию может повлиять на гладкость лучевой картины. При густой решетке изменять параметр не имеет смысла. Увеличение точности сильно увеличивает время решения. Точность связана с разрешением и часто возможностей для регулировки просто нет. Если она все же есть, то изменить точность можно так. Раскройте панель *Ray-Tracing Precision* копкой "+". Регулировка по принципу увеличить-уменьшить осуществляется ползунком, которой можно перемещать между положениями *High* (высокая) и *Low* (низкая). Значение по умолчанию восстанавливается щелчком по ссылке *Default*. Точность задается отдельно по каждой переменной. Переключение ползунка между переменными X и Z осуществляется одноименными радио-кнопками.

### Выполнение

Щелчок по кнопке *Start* запускает сеанс решения прямой задачи. Модуль FPS разбивает все множество лучей, подлежащих трассировке, на группы. Группа содержит лучи одной волны от одного источника. Трассировку лучей одной группы выполняет программа Ray Tracer (RT). Это имя встречается в протоколе. У RT нет окна, и его активность не заметна. Если компьютер имеет обычный процессор, то FPS последовательно выдает задания RT на трассировку групп лучей. Если процессор многоядерный, то FPS запускает несколько экземпляров RT и закрепляет каждый за своим логическим процессором. В этом случае одновременно (*concurrently*) обрабатываются несколько групп. Так алгоритм адаптируется к возможностям компьютера.

Распараллеливание сказывается на времени решения (см. пример в разделе [Что нового в версии 3?](#)), но меньше, чем мог бы ожидать пользователь. Дело в возрастающих накладных расходах системы и обмене с диском. Решение прямой задачи занимает все свободные ресурсы процессоры, поэтому не следует запускать одновременно с FPS другие ресурсоемкие приложения.

Процесс выполнения отображается в окне FPS прогрессором. Над прогрессором выводится список групп, обрабатываемых в настоящее время (рис. 3). Группа представляется строкой <волна>/<ID источника>. Выполнение можно прервать кнопкой *Abort*.

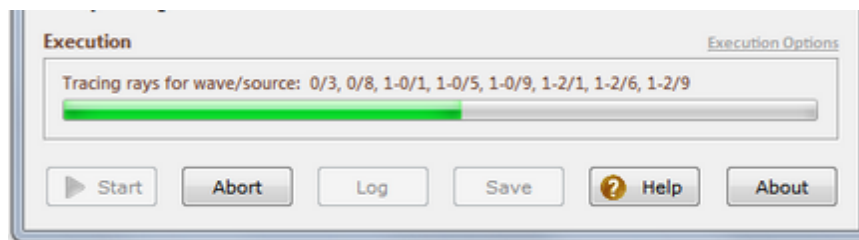


Рис. 3. Отображение хода выполнения.

### Протокол. Потерянные лучи

После завершения трассировки лучей следует просмотреть протокол решения. Он содержит задание и ин-

формацию по каждой группе лучей. Факт завершения решения без ошибок еще не означает успеха. Успех определяется малой долей потерянных лучей. Наличие пары источник-приемник во входном каталоге лучей означает не более, чем *намерение* трассировать этот луч. *Возможность* трассировки определяется в процессе трассировки. Луч от источника может не дойти до приемника при данном распределении скорости. Например, он может выйти за пределы модели. Большой процент потерянных лучей говорит о несоответствии системы наблюдений распределению скорости. В случае I-проекта он говорит о неверной подготовке данных, но чаще, – о неверном выборе скоростной модели. Изучение протокола полезно для прояснения ситуации.

### Сохранение решения

Если решение признано успешным, его следует сохранить. Кнопка *Save* запускает перенос результатов из временных хранилищ в выходной Каталог лучей и файл лучевых путей. Протокол выполнения сохраняется в f-узле и может быть прочитан в любой момент с помощью команды *View FPS Log* из меню Дерева обработки. Каталог лучей можно просмотреть по команде *View Catalog of Traced Rays*, поданной на f-узле после завершения FPS.

Если решение забраковано, следует выйти из FPS без сохранения. В этом случае, а также при завершении с ошибкой или из-за пользовательского прерывания, новый f-узел удаляется из Дерева, но протокол сохраняется. Его можно прочитать той же командой *View FPS Log*, но вызванной на o-узле. Команда выводит список протоколов неудачных сеансов решения прямой задачи на этом o-узле. В списке протоколы представлены временами их создания. Список имеет меню для чтения протокола и удаления. Открыть протокол можно также двойным щелчком мыши по нужной строке.

### Параметры выполнения

Описанный выше процесс выполнения можно несколько изменить настройкой двух параметров (ссылка *Execution Options*). Если установлен *флаг автосохранения* (auto-save), FPS выполняет сохранение решения сразу после успешного завершения трассировки лучей. Индекс параллельности (concurrency index) – это число логических процессоров, используемых для решения прямой задачи. По умолчанию, он равен числу логических процессоров в системе. Формально индексу можно присвоить и большее значение, но это вряд ли приведет к ускорению решения, поскольку процессоры практически не простаивают.


## 3 Лучевая картина

Изображение трассированных лучей – функция графического модуля Forward Problem Solution Viewer (FPV). В I-проекте он, кроме того, реализует анализ невязок времен. Цель анализа – изучение невязок наблюдаемых и расчетных времен. По результатам анализа делается вывод о том, в какой степени использованная при трассировке модель согласуется с наблюдаемыми временами, и принимается решение о дальнейших действиях. Либо модель считается результатом интерпретации, либо требуется ее уточнение. Если уточнение будет проводиться путем решения обратной задачи томографии, FPV – при необходимости – реализует замораживание скорости в подобластях модели и формирует выборки лучей для обращения. Если интерпретируется слоистая модель, сказанное выше может относиться к определенному интервалу разреза.

Порядок изложения:

- вывод лучей и годографов;
- создание выборок лучей;
- статистики и распределения невязок;

- плотность лучевого покрытия;
- подготовка к обращению;
- экспорт в графические и ASCII файлы.

Как графический модуль FPV отличается от всех остальных наличием двух планшетов. М-планшет выводит модель и лучи, Т-планшет – расчетные годографы (TX-curves), а в I-проектах – и наблюдаемые годографы. Т-планшет может быть пристыкован (docked) к М-планшету в главном окне, либо выводится в отдельном окне. Соответственно, в меню *View* добавлены команды *Show TX-Plot* и *Dock TX-Plot*, а на панель инструментов – дублирующие кнопки. Выводом лучей и их выборки управляет меню *Rays*, а также кнопка  с выпадающим меню. Это последнее будем называть *л-меню*.

### Вывод лучей

При запуске на f-узле FPV показывает только М-планшет с изображением модели. Чтобы вывести лучи, в л-меню выбираем команду *Display All Rays*. После завершения рисовки видим лучевую картину (ray picture). На рис. 1 показана лучевая картина для выборки лучей. Число лучей указано на статусной панели справа. Наряду с лучами, могут изображаться источники и приемники. Л-меню содержит команды-переключатели *Show...*, позволяющие при перерисовке М-планшета выводить источники, приемники и лучи. Команда *Show All* просто переключает предшествующие команды в положение "показать".

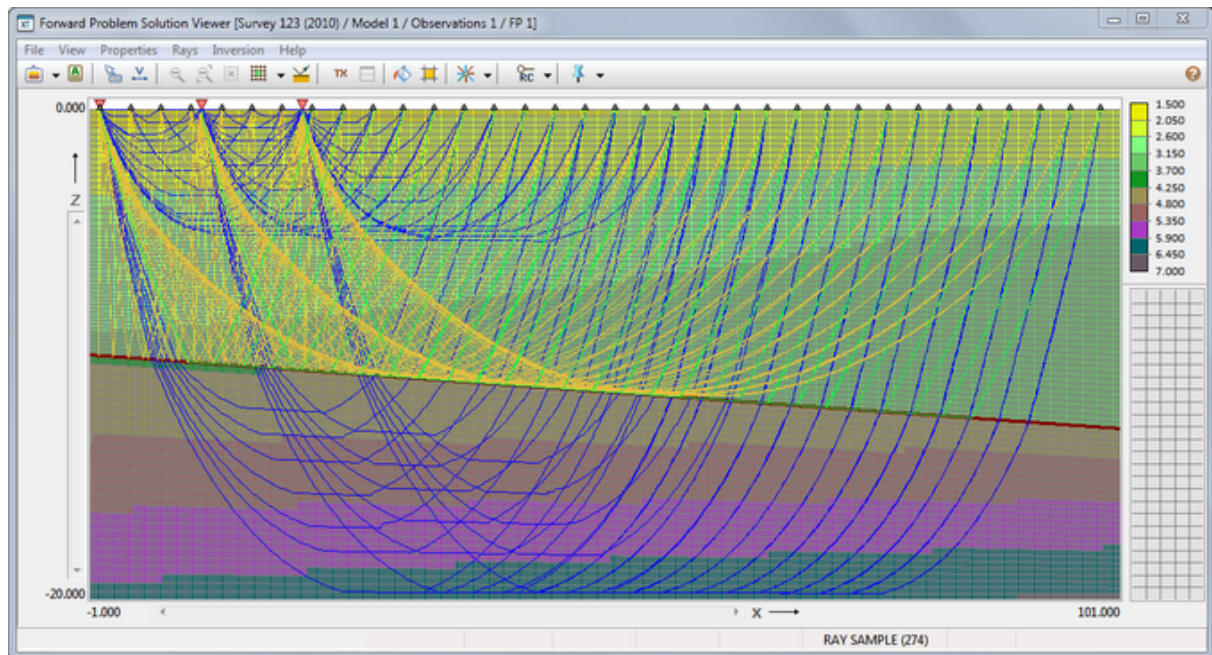


Рис. 1. FPV: М-планшет с выборкой лучей.

Напомним, что атрибуты рисовки лучей и расчетных годографов определяются волной и находятся в ведении Менеджера волн. К этим атрибутам не относится толщина линии луча (по умолчанию, 1 пиксель). Изменить толщину луча, а также атрибуты рисовки источников, приемников и наблюдаемых времен можно командой главного меню *Properties/Drawing Attributes*. В меню *Properties* добавлена новая команда *Special Grid Colors*. В диалоге, который она вызывает, можно изменить все цвета, которые приходится настраивать в FPV.

Ray List		102 rays		Ray Path					Traveltime 7.185
Source ID	Receiver ID	Point #	X	Z	Row/Col	Link time			
1	1	1	0.000	-0.010	1 / 5	0.000			
1	4	2	0.138	-0.124	1 / 5	0.094			
1	7	3	0.294	-0.250	1 / 6	0.105			
1	10	4	0.366	-0.290	2 / 6	0.042			
1	13	5	0.594	-0.457	2 / 7	0.144			
1	16	6	0.641	-0.500	2 / 8	0.033			
1	19	7	0.821	-0.624	3 / 8	0.109			
1	22	8	1.008	-0.750	3 / 9	0.112			
1	25	9	1.049	-0.783	4 / 9	0.026			
1	28	10	1.277	-0.928	4 / 10	0.131			
1	31	11	1.389	-1.000	4 / 11	0.064			
		12	1.504	-1.077	5 / 11	0.066			
		13	1.732	-1.211	5 / 12	0.125			

Рис. 2. FPV: вывод лучевых траекторий.

Команда главного меню *Rays/Ray Paths as Tables* выводит лучевые траектории в виде иерархии таблиц (рис. 2). Ведущим ключом при выводе является волна. Она выбирается из выпадающего списка внизу. Левая таблица *Ray List* выводит перечень лучей данной волны. В ней луч идентифицируется ID источника и ID приемника. Правая таблица *Ray Path* выводит траекторию луча, выделенного в таблице *Ray List*. Точки луча (points) пронумерованы от источника к приемнику (первая колонка). Для каждой точки выводятся координаты, индекс ячейки решетки (Row/Col), а также время пробега по звену луча (Link Time) от предыдущей точки до данной. Полное время пробега (traveltime) выведено над таблицей. Концевые точки луча совпадают с источником и приемником.

### Вывод большого числа лучей

Лучевые пути хранятся в файле, размеры которого для содержательных задач могут составлять десятки и сотни мегабайт. Время вывода такого количества информации зависит от производительности центрального и графического процессоров рабочей станции и скорости обмена с диском. Дело не только в однократном выводе, а в необходимости перерисовки при манипуляциях с окном FPV: изменении размеров, увеличении, выделении подрешетки и пр. Вообще при большом числе лучей следует работать с выборками лучей (см. следующий раздел). Все же, чтобы не превращать работу в постоянное ожидание, имеется возможность прервать вывод лучей. Если общее число лучей более 5000, то при выводе на инструментальной панели появляется кнопка **✖ STOP**. Щелчок по кнопке останавливает вывод на экран и сбрасывает переключатель вывода лучей. Дальнейшая работа с окном происходит без рисовки лучей, пока пользователь не включит ее в л-меню. Пока лучи рисуются, изменение размеров окна и прочие операции блокированы.

### Вывод годографов. Т-планшет

После первого вывода лучей в сеансе работы FPV активизируется команда *View/Show TX-Plot* и кнопка TX на панели инструментов. Щелчок по кнопке выводит в верхней половине окна Т-планшет, а на нем – годографы ОПВ, построенные по расчетным временам (рис. 3а). В I-проекте на том же планшете выводятся наблюдаемые годографы. Расчетные годографы используют атрибуты рисовки волны и выводятся поверх наблюдаемых. Линию раздела планшетов можно перетаскивать курсором. Планшеты синхронизированы по выборке лучей. Это значит, что выводятся только времена пробега по лучам, которые выводятся на М-планшете.



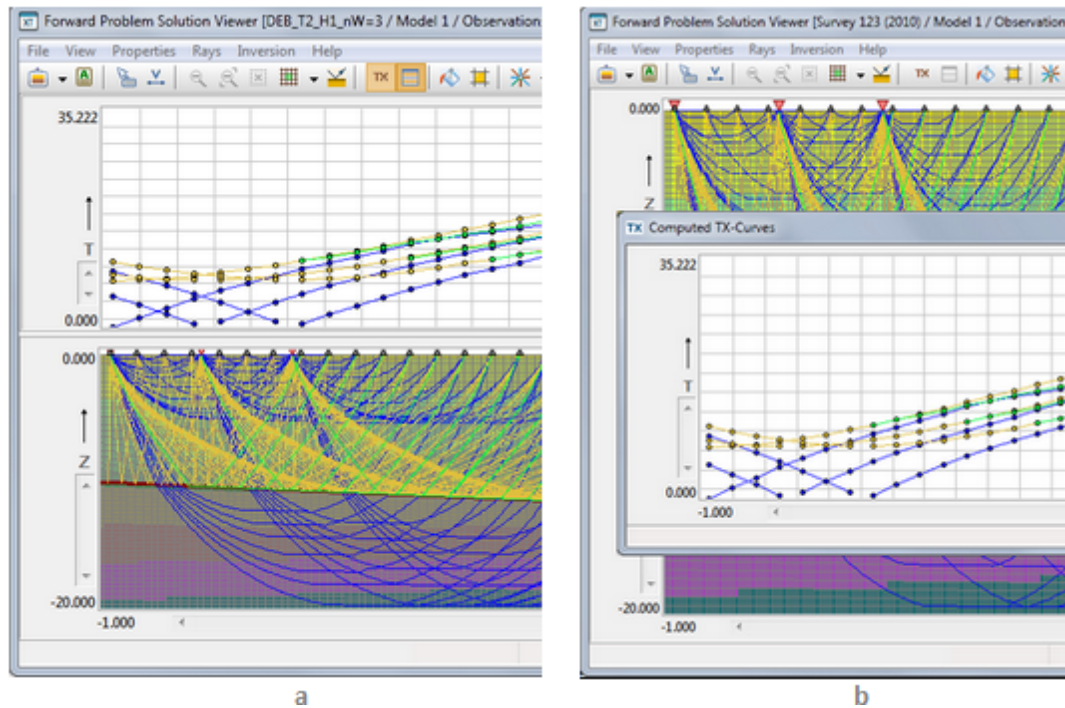



Рис. 3. FPV: Т-планшет. а – пристыкован к М-планшету (docked); б – автономный режим вывода (undocked).

Т-планшет имеет лупу и селектор годографов. Годограф выделяется резиновым контуром по самой левой и верхней точке внутри контура. Выделенный годограф можно просмотреть в виде таблицы. Диалог с таблицей – и дополнительными сведениями о годографе – выводится командой *Selected TX-curve in Detail* в меню планшета. Оба планшета X-синхронизированы. Это значит, что использование лупы в одном из них влечет изменения, касающиеся координаты X, в другом. Вывод годографов требует значительно меньше времени, чем вывод лучей. Прерывание рисовки годографов не предусмотрено.

После первого вывода Т-планшета в сеансе работы FPV активизируется команда-переключатель *View/Dock TX-Plot*. Если у команды стоит галочка, Т-планшет выводится, как описано выше, в составе главного окна (связанное состояние, docked). Если выбрать команду *Dock TX-Plot* в этом состоянии, Т-планшет появится в отдельном окне, а главное окно целиком будет занято М-планшетом (автономное состояние, undocked, рис. 3b). Используя эту команду можно переключать режим вывода, если необходимо. Особенности автономного состояния:

- в меню Т-планшета появляется команда *Dock*;
- команда *View/Show TX-Plot* показывает или скрывает Т-планшет, сохраняя состояние;
- команда *View/Tile horizontally* располагает главное окно и окно Т-планшета рядом, так что каждое занимает половину экрана;
- X-синхронизация включается/выключается командой *Sync Grid and TX plots*, которая имеется и в меню *View* главного окна, и в меню Т-планшета.

## 4 Выборки лучей. Создание и сохранение

Осмысленные выборки лучей нужны для изучения лучевой картины. Но главное их назначение – отбор лучей для обратной задачи. В последнем случае создается оптимальная выборка лучей, освещающих изучаемый интервал разреза, а также имеющих невязки, лежащие в разумном диапазоне. Построение выборки запускается командой *Rays/Create Ray Sample* или кнопкой . Оно выполняется модулем Ray Sample Builder (окно FPV при этом не доступно).

### Критерий выборки

Поля главного окна модуля Ray Sample Builder (рис. 1а) хранят условия, из которых критерий выборки составляется посредством логической операции "И".

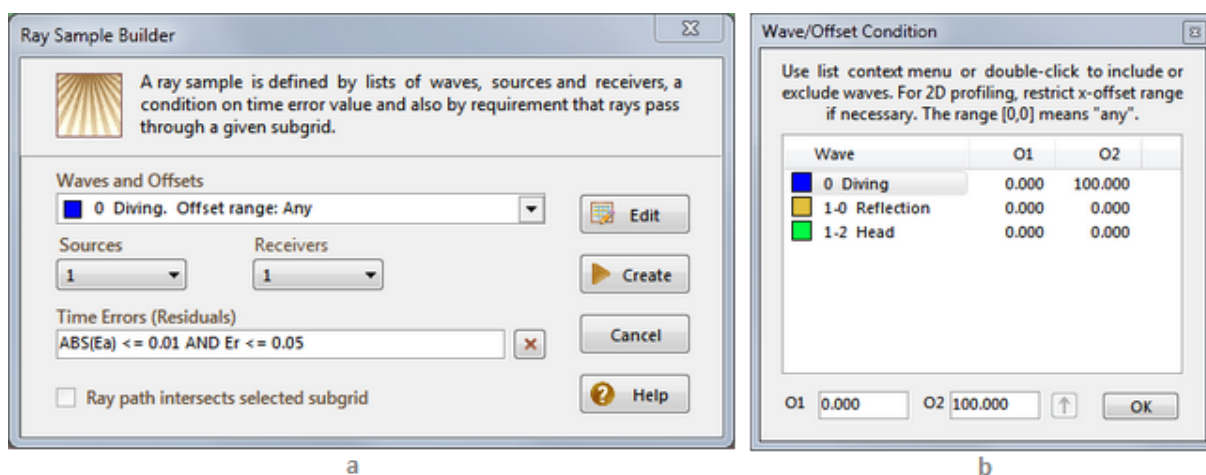



Рис. 1. Модуль Ray Sample Builder. а – главное окно; б – составление условия "волны и удаления".

Поле *Waves and Offsets* является списком волн и диапазонов удалений. Только лучи указанных волн с расстоянием источник-приемник из указанных диапазонов войдут в выборку. Расстояние понимается как расстояние между проекциями на ось ОХ. Поля *Sources* и *Receivers* содержат списки источников и приемников. Поле *Time Errors* содержит условие на абсолютные и/или относительные невязки времен, состоящее из одного или двух неравенств, соединенных логическими операциями "И" или "ИЛИ". Поле доступно только для I-проектов. Если оно пусто, то игнорируется. Флаг *Ray Path...*, если он поднят, ограничивает выборку лучами, пересекающими область модели, которая была выделена перед запуском модуля.

### Создание/изменение условий

Кнопка *Edit* выбрасывает меню для выбора условия. Каждая команда меню открывает диалог для редактирования. Диалог, который открывает команда *Waves* (рис. 1б), выводит список всех волн, обнаруженных в Каталоге лучей, но только волны, отобранные для выборки лучей, имеют цветные значки. Двойной щелчок или первая команда контекстного меню включает/исключает волну. Две другие команды включают/исключают все волны. Колонки O1 и O2 содержат границы диапазона удалений. Их значения для выделенной строки редактируются в одноименных полях под списком. Редактирование должно завершиться либо клавишей , либо щелчком по кнопке со стрелкой. Тогда новые значения попадут в список. Кнопка OK формирует новое условие в виде списка в главном окне модуля. Если O1 = O2 = 0, ограничений на удаления не накладывается.

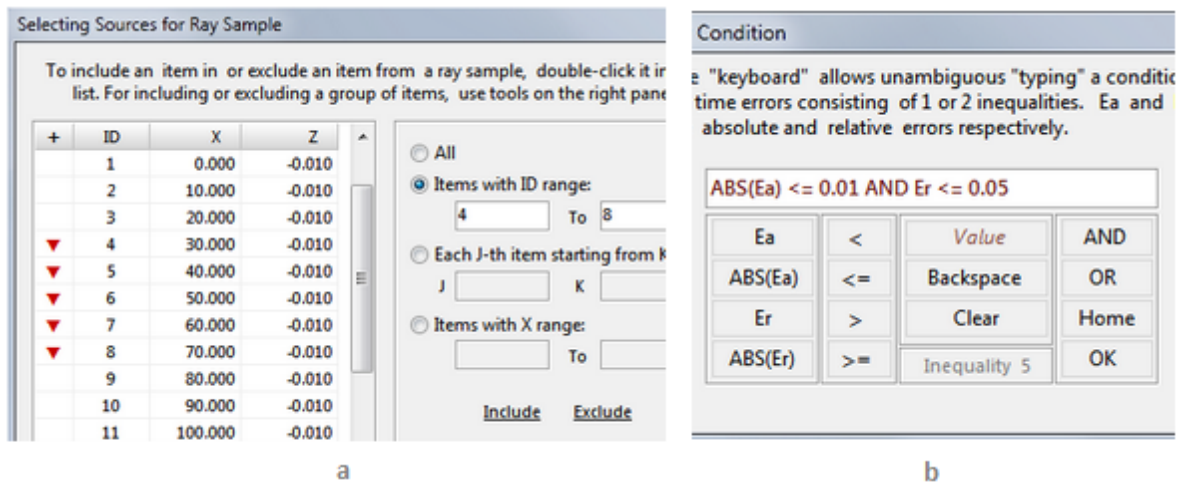


Рис. 2. Модуль Ray Sample Builder. а – составление условия "источники"; б – составление условия "невязки времени".

Диалог, выводимый командой *Sources*, показан на рис. 2б. Слева находится список всех источников в Каталоге лучей. Те, что включаются в выборку, помечены значком в первой колонке. Включение/исключение осуществляется двойным щелчком по строке списка. Операции по включению/исключению групп источников организуются на правой панели. Можно определить группу одним из четырех способов:

- все источники (All);
- источники с ID из заданного интервала;
- каждый J-й источник, начиная с K-го;
- все источники с абсциссами из заданного интервала.

Когда операция выбрана, и интервал определен, надо щелкнуть по ссылке *Include* (включить) или *Exclude* (исключить). Кнопка OK формирует список отобранных источников в главном окне модуля. Приемники отбираются в точности так же.

Команда *Edit/Errors* выводит диалог с клавиатурой для набора условия (рис. 2б). Компоненты допустимых неравенств являются клавишами. Числовые значения вводятся в поле *Value* после щелчка по нему. Метка *Inequality N* ( $N = 1$  или  $2$ ) показывает, какое неравенство находится в фокусе ввода. Клавиша OK завершает редактирование.

### Создание и вывод выборки. Текущее множество лучей

После формирования условий выборка щелкните по кнопке *Create*. Ray Sample Builder выполняет поиск нужных лучей, сохраняет выборку и завершает работу. Выборка лучей выводятся на М-планшет, соответствующие годографы – на Т-планшет. Объем выборки можно увидеть на статусной строке. Выборка лучей хранится в базе данных выборки, отдельно от Каталога лучей. FPV может визуализировать оба хранилища по очереди командами л-меню *Display All Rays* или *Display Last Ray Sample*. Выбранная команда помечается жирной точкой слева. Удобно выбранное множество лучей (Все лучи или Выборка) назвать *текущим*. Лучевая картина всегда относится к текущему множеству лучей. О том, каково текущее множество, можно судить и по надписи в статусной панели. Просмотреть критерий последней выборки можно, либо запустив Ray Sample Builder (он всегда сохраняет критерий), либо – в текстовой форме – по команде *Last Sample Description* в меню *Rays* или л-меню.

### Сохранение выборок лучей для обращения в I-проекте

Если выборка сделана для цели, указанной в заголовке пункта, то сохранить ее следует так:

- завершить FPV и перейти в Менеджер проектов;
- выделить в Дереве f-узел, в котором сделана нужная выборка лучей;
- щелкнуть по кнопке копирования узлов Деревя (команда *Processing Tree/Copy Node*).

Менеджер проектов создаст в Дереве узел-близнец и поместит туда нужные данные. Задачу обращения следует запускать на этом новом f-узле. Этот f-узел называется *виртуальным* в знак того, что он не образовался в результате решения прямой задачи. Можно сохранить несколько выборок из каждого настоящего f-узла, т.е. создать несколько виртуальных узлов. Виртуальные узлы имеют измененный значок, и в Дереве их легко узнать. Если применить команду *View FPS Log* на виртуальном f-узле, то вместо протокола решения выводится текст с информацией об f-узле, в котором была создана выборка, и описанием выборки лучей. Виртуальный f-узел можно создать только из настоящего f-узла.

## 5 Изучение невязок в I-проекте

### Статистики

Команда *Error Statistics* имеется в обоих меню Т-планшета: контекстном меню и рк-меню. В первом случае она применяется к **текущему множеству лучей**, во втором – к невязкам времен точек (X, T) внутри резинового контура. Результаты вычислений в обоих случаях выводятся в диалоге, показанном на рис. 1. При вызове диалога из рк-меню область выделения на планшете подсвечивается.

Absolute Error $E_a = T_o - T_c$			
Statistic	All Rays	$E_a \geq 0$	$E_a < 0$
Number of rays	2903	1754	1149
Mean value	0.00022	0.00056	-0.00031
Minimal value	-0.00155	0.00000	-0.00155
Maximal value	0.00267	0.00267	0.00000
Median	0.00012	0.00039	-0.00026
Std deviation	0.00062	0.00054	0.00026
Relative Error $E_r = E_a / T_o$			
Mean value	0.00009	0.00024	-0.00015
Minimal value	-0.05380	0.00000	-0.05380
Maximal value	0.08960	0.08960	0.00000
Median	0.00001	0.00003	-0.00002
Std deviation	0.00302	0.00350	0.00208

Рис. 1. Диалог для вывода статистик невязок.

Рассчитываются следующие статистики: число лучей в текущем множестве (годографе), среднее, минимальное и максимальное значения, медиана и стандартное отклонение. Статистики вычисляются для абсолютной невязки  $E_a = T_o - T_c$  (верхняя таблица) и относительной невязки  $E_r = E_a / T_o$  (нижняя таблица);  $T_o$  и  $T_c$  – наблюдаемое и расчетное время пробега по лучам. Расчет проводится одновременно для всех лучей (колонка 1) и подмножеств лучей с положительными и отрицательными невязками (колонки 2 и 3). Результаты по невязкам разных знаков несут информацию о том, в каком направлении следует изменять скорость в модели, чтобы уменьшить абсолютную величину невязок. Результаты можно вывести в тексто-

вый файл (кнопка *Save*). В файле будет указано текущее множество лучей, а в случае выделения области планшета - в файл помещается описание этой области.

Среднее и стандартное отклонение для  $E_a$  и  $E_r$  для выделенного годографа можно найти в диалоге, который выводит таблицу годографа (команда *Selected TX-Curve in Detail* меню Т-планшета).

### Распределения относительной невязки

Статистические распределения для относительной невязки рассчитываются для текущего множества лучей. Исследуемая величина – модуль относительной невязки  $|E_r|$ . Как и в случае статистик, распределения рассчитываются для трех множеств лучей: А – все лучи текущего множества; Р – подмножество лучей с положительными, N – с отрицательными невязками. Распределения представляются в виде графиков выборочной функции плотности D (гистограммы) и выборочной функции распределения C.

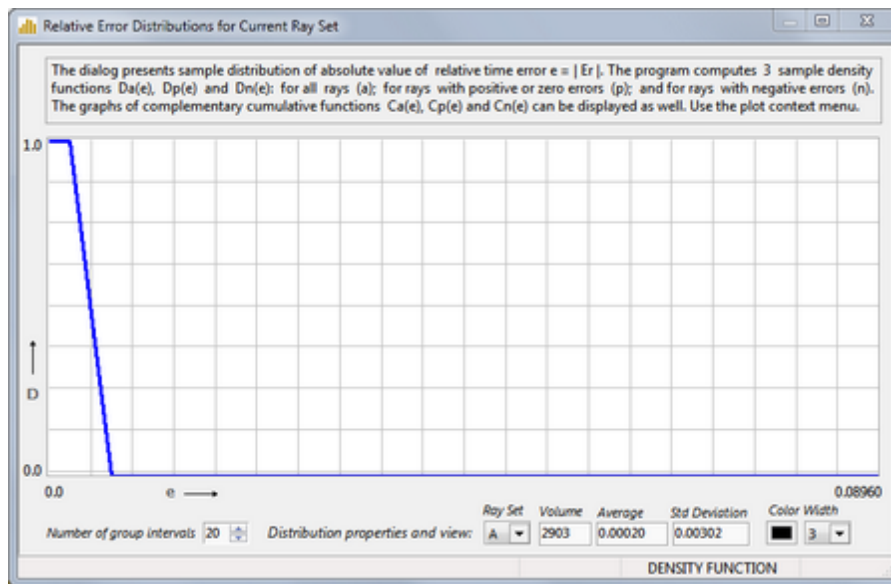


Рис. 2. Диалог для вывода распределений невязок.


Для вывода графиков следует в меню Т-планшета выбрать команду *Relative Error Distribution*. Она выводит диалог (рис. 2) с планшетом. При вызове на планшете изображается функция распределения  $D(e)$  для множества лучей А. Настройка планшета производится элементами управления в нижней части окна и контекстным меню планшета. Выпадающий список *Number of group intervals* позволяет подобрать оптимальное для изображений число интервалов группирования. Остальные элементы управления выводят статистики и позволяют изменить атрибуты рисовки для распределения множества лучей, выбранного в списке *Ray Set*. Контекстное меню планшета содержит переключатель "функция плотности – функция распределения" и флаги вывода графиков на планшет.

## 6 Плотность лучевого покрытия

Плотность лучевого покрытия (Ray Coverage, RC) характеризует степень покрытия модели лучами. Функции плотности можно рассчитать в проектах обоих типов, но информация о покрытии актуальна для I-проектов. Она предсказывает, насколько чувствительно решение обратной задачи томографии к изменению скорости в различных областях модели. Чувствительность высока, если область пересекается

большим числом лучей, причем в разных направлениях. Напротив, в области, которую лучи не пересекают, изменение скорости не влияет (или мало влияет) на решение обратной задачи. Чувствительность прямо связана с надежностью решения обратной задачи: чем лучше освещена лучами область модели, тем надежнее в ней будет уточнена скорость.

Модуль FPV рассчитывает три функции плотности лучевого покрытия: RC, RCH, RCV. Все они заданы на решетке. Пусть  $c$  – ячейка решетки.  $RC(c)$  – это общее число лучей,  $RCH(c)$  – число субгоризонтальных лучей,  $RCV(c)$  – число субвертикальных лучей, пересекающих ячейку  $c$ . Луч пересекает ячейку *субвертикально*, если угол между звеном луча в ячейке и вертикалью меньше  $\pi/4$  по абсолютной величине. В противном случае луч пересекает ячейку *субгоризонтально*.

Все три функции вычисляются один раз и затем сохраняются. Их можно вывести на планшет в виде цветных карт, а также экспортировать. Для работы с лучевым покрытием используется кнопка панели инструментов  с выпадающим меню (rc-меню). Команды меню доступны после вычисления. Чтобы вычислить плотности покрытия, щелкните по самой кнопке. В диалоге *Ray Coverage Functions* (рис. 1а) щелкните по кнопке *Compute*.

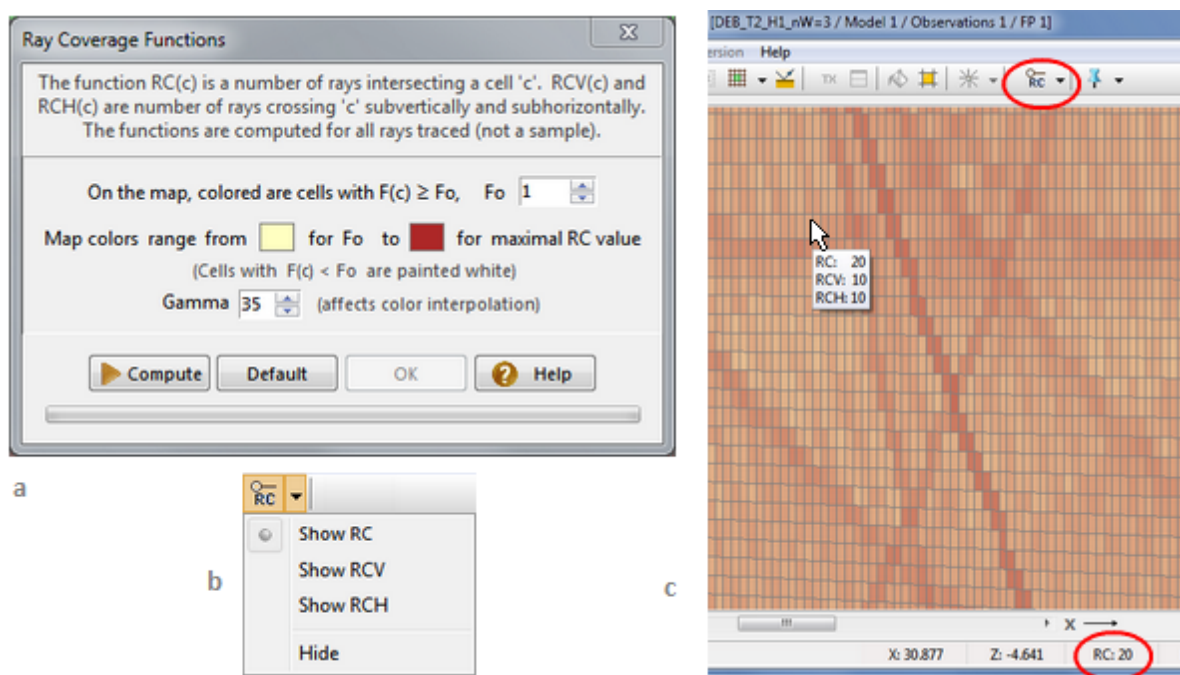


Рис. 1. Расчет и визуализация плотностей лучевого покрытия.

а – диалог для расчета плотностей и задания параметров карт; б – rc-меню; в – карта функции плотности RC.




После расчета функции плотности должны быть визуализированы. Поля диалога связаны с настройкой карты. Пусть  $F(c)$  – одна из функций плотности. На карте  $F(c)$  окрашены ячейки, для которых  $F(c) \geq F_0$ , где  $F_0$  задается в поле прокрутки. Цвет, которым окрашены ячейки с минимальным и максимальным значениями  $F(c)$ , совпадает с цветом прямоугольников. Его можно изменить, щелкнув по прямоугольнику. Цвет ячеек с другими значениями  $F(c)$  определяется посредством интерполяции между цветами прямоугольников. Величина гамма управляет смещением цветов при интерполяции и подбирается эмпирически.

После задания параметров карты можно вывести их карты можно командами rc-меню (рис.1б). Имя и значения выбранной функции в ячейке под курсором выводятся в поле статусной панели для скорости. Если выбрать опцию вывода информации под курсором (*View/X,Y,V under Cursor*), то в окне подсказки по-

явятся значения всех трех функций (рис. 1с). Для возврата к лучевой картине выберите в гс-меню команду *Hide*.

## 7 Подготовка к томографии

В сложном процессе интерпретации нередко возникает следующая проблема: как уточнить скорость с помощью томографии и гарантировать при этом, что скорость в указанных подобластях модели останется неизменной. Такая задача рутинно возникает при изучении слоистой среды, когда слои изучаются один за другим сверху вниз. Система томографии XТomo-LM позволяет сделать это. От пользователя требуется только описать подмножества модели. Эта последняя задача называется замораживанием (freezing) или фиксацией (fixing) скорости в ячейках. Вместо фразы "ячейка с фиксированной скоростью" будем писать "ф-ячейка" (в пользовательском интерфейсе FPV – fixed cells). При решении обратной задачи скорость в ф-ячейках не меняется. Замораживание скорости позволяет использовать априорную информацию о скорости в подобласти модели, блокируя ее изменение. Кроме того, только с помощью замораживания скорости можно реализовать пошаговое изучение разреза, например, послонную интерпретацию.

Команды работы с ф-ячейками находятся в меню *Inversion* и дублируются кнопкой  и командами ее выпадающего меню (ф-меню). Первая операция – перевод FPV в режим фиксации (fix mode) кнопкой . При этом она поменяет цвет на красный. Это является индикатором режима, как и надпись FIX MODE в крайнем правом поле статусной панели. Если до включения режима множество ф-ячеек уже было не пусто, они окрасятся цветом, зарезервированным для ф-ячеек. Чтобы заморозить скорость в выделенной подобласти модели, используйте команду меню М-планшета *Add to Fixed Cells* (Добавить к ф-ячейкам). Чтобы разморозить выделенные ячейки, подайте команду *Release Fixed Cells* (Освободить ф-ячейки). Команда *Release All* в меню *Inversion* или ф-меню освобождает все ф-ячейки. Цвет ф-ячеек можно изменить командой ф-меню *Change Fix Color*. Для выхода из режима фиксации следует щелкнуть по кнопке . Множество ф-ячеек сохраняется после выхода из режима фиксации и из программы.

Механизм фиксации FPV включает еще возможность фиксировать скорость в ячейках в зависимости от значений в них функций плотности лучевого покрытия. Например, можно при томографическом обращении запретить изменение скорости в ячейках с нулевым или малым значением функции RC. Операция реализуется командой *RC Conditioned Fix* ф-меню. Она выводит диалог для ввода условия типа равенства или неравенства (рис. 1).

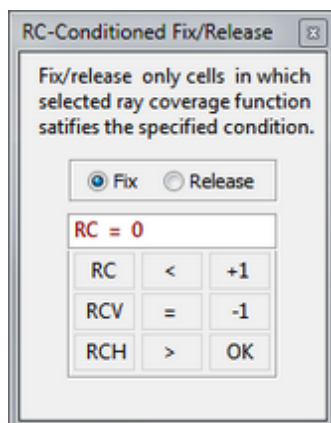


Рис. 1. Диалог для ввода условия на плотность лучевого покрытия.

Радио-кнопками выбираем тип операции: фиксация или освобождение. Условие по умолчанию имеет вид  $RC = 0$ . В нем можно изменить вид функции плотности, знак и значение. Для этого используем клавиатуру. Значение можно ввести прямо в поле условия. Можно также использовать клавиши  $+1$  и  $-1$  для увеличения или уменьшения текущего значения. На этих клавишах кнопку мыши можно удерживать нажатой до получения нужного результата. Клавиша OK дает команду на выполнение.

## 8 Экспорт

### Графика

Модуль FPV позволяет экспортировать содержимое М- и Т-планшетов в графические файлы в том смысле и таким же образом, как выполняется графический экспорт в модуле [Model Viewer](#). Команда *File/Image Export* имеет подменю для выбора типа экспорта: *Model, Rays; Ray Coverage; TX-Curves*. Такое же меню выбрасывает соответствующая кнопка панели инструментов. Команда *Ray Coverage* доступна, только когда М-планшет изображает плотность лучевого покрытия. При этом выводится та из трех функций плотности, которая в данный момент изображена на планшете.

### ASCII файлы

Экспорт в текстовые файлы выполняется модулем FPV ASCII Exporter. Команда запуска (*File/ASCII Export*) доступна после первого вывода лучей. Главное окно модуля, похожее на диалог экспорта модуля *Model Viewer*, показано на рис. 1а. Вид экспорта выбирается из выпадающего списка *Data to Export*.

Доступен вывод следующих данных.

1. Вывод скорости с заданным условием на плотность лучевого покрытия. Скорость  $V$  выводится в файл типа [DAT](#) только в вершинах тех ячеек, в которых указанная функция плотности лучевого покрытия удовлетворяет заданному условию.
2. Вывод лучевых траекторий указанного множества лучей в файл типа [BLN](#).
3. Вывод указанной функции плотности лучевого покрытия в файл типа [DAT](#).
4. Создание файла [SRT](#) для указанного множества лучей с аддитивным шумом во временах. В файл выводятся *расчетные времена* с возможным добавлением нормального шума.

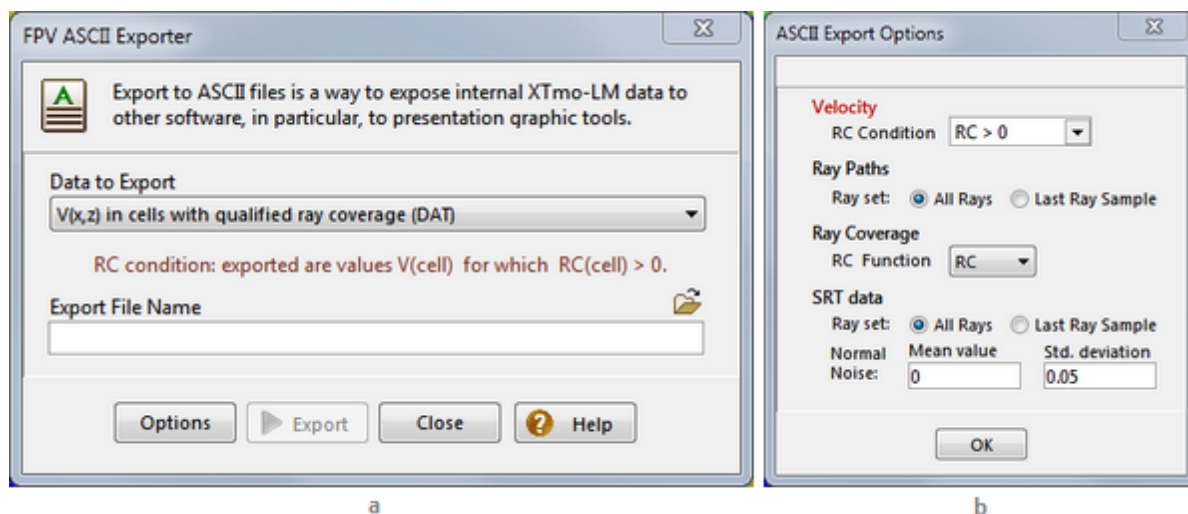


Рис. 1. Модуль FPV ASCII Exporter. а – главное окно со списком опций; б – диалог опций экспорта.

В каждом виде экспорта фигурируют параметры, значения которых следует определить. Это делается в диалоге, который вызывает кнопка *Options* (рис. 1б). В нем имя блока параметров, относящихся к выбранному виду экспорта, выделено цветом. В случае 1 (*Velocity*) тип функции плотности выбирается кнопкой-стрелкой справа от поля ввода, а пороговое значение вводится в поле. В случае 2 (*Ray paths*) следует задать множество лучей: все лучи или последняя выборка. В случае 4 (*SRT data*) следует выбрать множество лучей (все или последняя выборка), а затем ввести значения среднего значения и стандартного отклонения шума. Чтобы вывести не зашумленные расчетные времена, следует в качестве стандартного от-



клонения ввести 0.

Для выполнения экспорта следует выбрать имя файла и щелкнуть по кнопке *Export*.

# Решение обратной задачи томографии

## 1 Теория

### Задача томографии

Во [вводном разделе](#) документации обратная задача томографии сформулирована как линейная задача метода наименьших квадратов

$$(3a) \quad |\Delta T - \mathbf{D} \cdot \Delta \mathbf{V}|^2 \rightarrow \min.$$

Здесь  $\Delta \mathbf{V}$  – искомый вектор поправок к текущему приближению  $\mathbf{V}_0(x, z)$  скорости в модели. Скорость определяется своими значениями в узлах решетки, поэтому это вектор, размерность которого равна числу ячеек решетки  $m$ .  $\Delta T$  – вектор невязок наблюдаемых времен и времен, рассчитанных при решении прямой задачи для  $\mathbf{V}_0$ . Его размерность равна числу лучей  $k$  в Каталоге лучей  $f$ -узла. Наконец,  $\mathbf{D}$  – это матрица с  $k$  строками и  $m$  столбцами. Элемент матрицы в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце является частной производной от времени пробега по  $i$ -му лучу по скорости в  $j$ -й ячейке, вычисленной при скорости  $\mathbf{V}_0$ . Через  $|\cdot|$  обозначена евклидова норма вектора (квадратный корень из суммы квадратов компонент вектора). Формула (3a) отличается от формулы (3) во введении отсутствием значка размерности у нормы и тем, что здесь стоит квадрат нормы. Размерность нормы в нашем случае равна  $k$  и опускается. Наличие квадрата не меняет сути задачи, но упрощает формулы. Новое приближение к скорости в модели равно  $\mathbf{V}_0 + \Delta \mathbf{V}$ .

Переход от общей обратной кинематической задачи к обратной задаче томографии выполнен в предположении малости поправок  $\Delta \mathbf{V}$ . При этом предположении сложный оператор расчета времени по трассированному лучу заменен на его линейное приближение. Элементы матрицы  $\mathbf{D}$  удается вычислить опять же в предположении малости поправок. Трудность здесь в том, что при изменении скорости меняется и траектория луча. Однако, удается показать, что изменение времени по лучу, вызванное изменением траектории, мало по сравнению с тем, что вызывается изменением величины скорости. Поэтому изменением лучевого пути можно пренебречь и считать, что он не изменился. Тогда элементы матрицы  $\mathbf{D}$  можно выразить явно через время пробега в ячейке и скорость  $\mathbf{V}_0$  в ячейке.

### Регуляризация

Проблема в том, что задача (3a) является *некорректной* (ill-posed problem). Она не является однозначно разрешимой и устойчивой к изменению входных данных. Дело в том, что гарантировать существование минимума можно только для функций определенного класса – выпуклых, а целевая функция (objective function) в (3a) таковой не является. Пояснение для функций одной переменной дано на рис. 1.

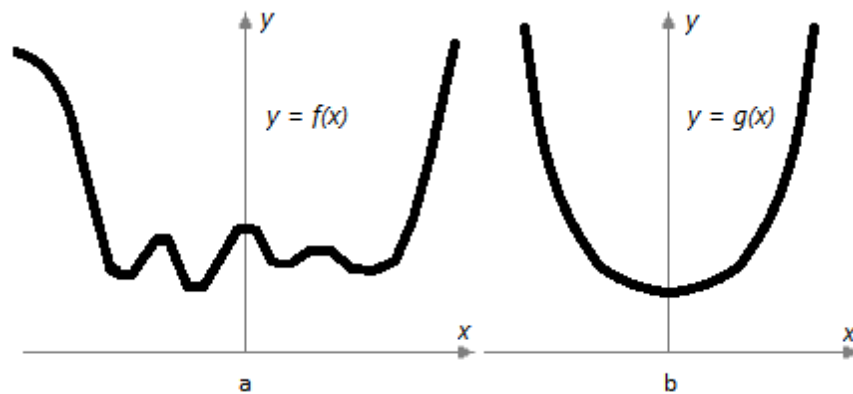


Рис. 1. Для функции одной переменной выпуклость на области определения и наличие стационарной точки гарантирует существование и единственность минимума. Обобщение понятия выпуклости на функции многих переменных играет ключевую роль в теории оптимизации. а – многоэкстремальная невыпуклая функция со стационарными точками; b - выпуклая функция со стационарной точкой

Теория некорректных задач предлагает способ *регуляризации* задачи (3а), т.е. изменение постановки задачи с целью сделать ее корректной (robust or well-posed problem). Задача (3а) заменяется задачей

$$(4) \quad |\Delta T - D \cdot \Delta V|^2 + \alpha \cdot R(\Delta V) \rightarrow \min.$$

где  $R$  – известная выпуклая функция  $k$  переменных. Действительное число  $\alpha > 0$  называется параметром регуляризации. Его назначение ясно: с одной стороны, чем оно меньше, тем ближе задачи (3а) и (4). С другой стороны, его следует выбрать настолько большим, чтобы целевая функция (4) стала выпуклой. Функция  $R$  называется *регуляризатором* или *стабилизатором* для задачи (3а).

Помимо обеспечения разрешимости, регуляризация позволяет в определенной степени придать решению "физичность". Процесс минимизации управляется одной целью: достигнуть минимума "любой ценой". Этой ценой может быть, например, слишком большие значения компонентов  $\Delta V$  в некоторых ячейках или осцилляция  $\Delta V$  при переходе от ячейке к ячейке. И то, и другое не имеет физического смысла. Подходящим выбором  $R$  можно избавиться от таких крайностей.

### Стабилизаторы

В XТомо-LM используются три стабилизатора для разных применений томографии. Стандартный стабилизатор имеет вид

$$R_d(\Delta V) = |\Delta V|^2.$$

Этот стабилизатор обеспечивает единственное решение (4) при достаточно большом  $\alpha$ . Сверх того, невязки времен минимизируются минимальными же поправками скорости. Поэтому упомянутая ситуация с аномальными значениями скорости исключена. В пользовательском интерфейсе этот стабилизатор называется демпфером (damper).

Если  $\Delta U$  – решение задачи (4) с  $R = R_d$ , то компоненты вектора  $\Delta U$  отвечающие ячейкам, через которые не проходят лучи, равны нулю. В противном случае, вектор  $\Delta U'$  с нулевыми компонентами в указанных ячейках не изменил бы первого слагаемого в (4), но уменьшил бы второе, что противоречит единственности решения. Значит,  $R_d$  не меняет скорость в ячейках, не освещаемых лучами.

Успешно борясь с аномальными значениями решения, Демпфер, однако, не исключает осцилляций по-

правок. Следующий стабилизатор  $R_s$  (smoothing damper) преследует именно эту цель. Его можно назвать глушителем осцилляций. Если бы  $\Delta V$  была гладкой функцией, его можно было бы записать так:

$$R_s(\Delta V) = R_d(\Delta V) + |(\Delta V)_x|^2 + |(\Delta V)_z|^2 = R_d(\Delta V) + |\text{grad}(\Delta V)|^2.$$

Значки  $x$  и  $z$  означают частные производные от поправок по  $x$  и  $z$ . Функция  $R_s$  включает в процесс минимизации величину градиента поправок, а значит исключает (в степени, определяемой величиной  $\alpha$ ), что минимум будет достигнут за счет резких локальных изменений поправок. В дискретном случае градиент заменяется разностями поправок в соседних ячейках.  $R_s$ , в отличие от  $R_d$ , может изменить скорость в ячейках, через которые не проходит ни одного луча. Если этот эффект нежелателен, следует перед решением обратной задачи заморозить скорость в ячейках с нулевым значением функции плотности РС.

В геофизических приложениях томографии, особенно глубинных исследованиях, глушитель осцилляций не вполне отражает суть дела, поскольку в земной коре вертикальный градиент скорости много больше латеральных изменений. В других приложениях ситуация может быть обратной. Более адекватным в этих случаях является направленный глушитель осцилляций  $R_e$  (evening damper):

$$R_e(\Delta V) = R_d(\Delta V) + \beta \cdot |(\Delta V)_x|^2 + |(\Delta V)_z|^2.$$

Он отличается от  $R_s$  множителем  $\beta$  перед нормой частной производной по  $x$ . Выбор подходящего  $\beta$  позволяет добиться доминирования вертикального ( $\beta > 1$ ) или горизонтального ( $\beta < 1$ ) градиента  $\Delta V$ , поскольку минимизируется, в первую очередь, большее слагаемое.

### Ограничения

Еще одним средством контроля над решением являются априорные ограничения на компоненты вектора  $\Delta V$ . Задача минимизации (4) является *безусловной*. Формально ее решение ищется на множестве всех векторов евклидова пространства размерности  $m$ . (Хотя мы пришли к этой задаче, предполагая малость  $\Delta V$ ). Вполне может случиться, что решение выходит за разумные пределы. XTomo-LM позволяет решать задачу (4) с ограничениями (constraint problem).

Первый тип ограничений – интервальные (interval constraints), т.е. условия вида

$$\mathbf{d}_1 \leq \Delta V \leq \mathbf{d}_2$$

где  $\mathbf{d}_1$  и  $\mathbf{d}_2$  – заданные векторы. Более точно, XTomo-LM предлагает два вида интервальных ограничений (5) специального вида:

$$(5a) \quad v_1 \leq \mathbf{V}_0 + \Delta V \leq v_2,$$

$$(5r) \quad p_1 \cdot \mathbf{V}_0 \leq \Delta V \leq p_2 \cdot \mathbf{V}_0,$$

где  $v_1$  и  $v_2$ ,  $p_1$  и  $p_2$  – заданные положительные числа. Ограничения (5a) устанавливают абсолютные границы для будущего вектора уточненной скорости. Конечно, эти границы не должны сужать диапазон изменения  $\mathbf{V}_0$ , иначе целевая функция может вырасти. Ограничения (5r) являются ограничениями на относительное изменение  $\mathbf{V}_0$  в ходе уточнения. Можно задавать только одно из условий (5).

Второй тип ограничений – обнуление некоторых компонент вектора  $\Delta V$  (zero correction constraints):

$$(5f) \quad (\Delta \mathbf{v})_j = 0, \quad j \text{ пробегает подмножество } \{1, 2, \dots, m\}.$$

Условия этого типа обеспечивают возможность фиксации скорости на подмножестве ячеек решетки. Ограничение (5f) можно комбинировать с интервальным.

### Решение задачи. Рекомендации

Решение оптимизационной задачи (4) с ограничениями скрыто от пользователя. Достаточно иметь в виду следующее. Методы решения оптимизационных задач являются итерационными. Критерий остановки связан с заданной точностью решения. Если точность равна  $\varepsilon$ , и новая итерация изменяет значение целевой функции менее чем на  $\varepsilon$ , процесс прекращается. XТomo-LM использует один из градиентных методов (методов спуска, descent). Число итераций для безусловной задачи относительно невелико, если не приближаться к критической ситуации, когда задача становится некорректной ( $\alpha$  слишком мало). Тогда число итераций резко возрастает, но требуемая точность не достигается. Задача может заикнуться. Поэтому в число параметров задачи обязательно включается предельное число итераций. Не следует завышать точность решения. Требование слишком высокой точности создает ту же критическую ситуацию.

Задача с ограничениями существенно сложнее. Когда последовательность приближений "упирается" в границу области, которая определяется ограничениями, спуск как бы начинается сначала. Общее число итераций значительно увеличивается. Сначала следует решить безусловную задачу (с замороженными, если надо, ячейками) и посмотреть, как ведет себя уточненная скорость. Если необходимость в использовании интервальных ограничений, действительно, есть, можно добавить интервальные ограничения. В задаче есть несколько параметров ( $\alpha$ ,  $\beta$ , точность и др.), поэтому сопоставление нескольких вариантов решения является обычной практикой.

## 2 Модуль Inverse Problem Solver

Модуль Inverse Problem Solver (IPS) запускается командой *Solve Inverse Problem* на f-узле Древа обработки. Перед запуском команда создает новый i-узел, в папке которого размещается решение. IPS реализует решение обратной задачи томографии в точном соответствии с "теорией". Пользовательский интерфейс использует в точности те же обозначения, что в предыдущем разделе. Интерфейс позволяет сформировать *задание* (task) для сеанса решения, т.е. задать тип регуляризации, параметры и ограничения.

### Задание

При запуске модуль выводит задание по умолчанию. Редактирование задания происходит так. На первой вкладке главного окна из выпадающего списка *Stabilizer* выбирается тип стабилизатора. Внизу вкладки имеется флаг, позволяющий выбрать упрощенный прикидочный метод обращения (метод обратных проекций). Он сохранен по традиции для старых пользователей. При современной производительности рабочих станций прикидка не требуется.

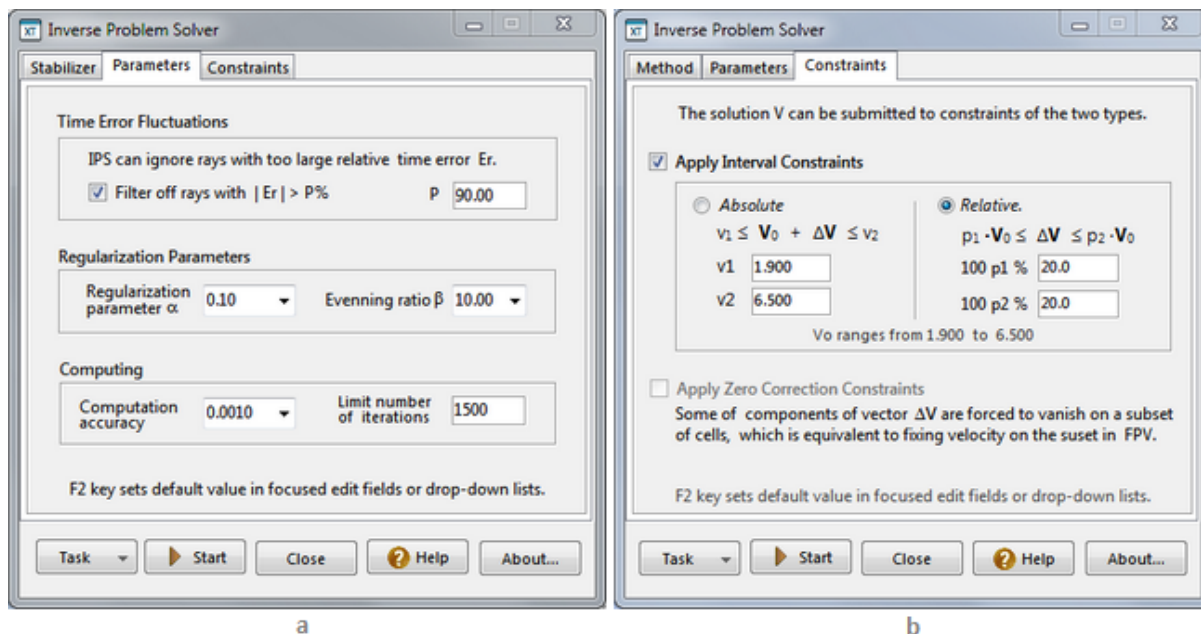


Рис. 1. Главное окно модуля IPS: а – вкладка "Параметры"; б – вкладка "Ограничения".

На вкладке *Parameters* (рис. 1а) задаются параметры задачи. Панель *Time Error Fluctuations* позволяет исключить из решения лучи с большими относительными невязками. На панели *Regularization Parameters* задается параметр регуляризации  $\alpha$ . Если в качестве стабилизатора выбран направленный глушитель осцилляций (evening damper), здесь же задается значение параметра  $\beta$ . Оба параметра выбираются из списков с типичными значениями. На панели *Computing* выбирается точность решения и максимальное число итераций.

На вкладке *Constraints* (рис. 1б) задаются ограничения. В задании по умолчанию ограничений нет. Для определения интервальных ограничений устанавливаем флаг *Apply Interval Constraints*. Далее радио-кнопками выбираем тип (абсолютные или относительные) ограничений и задаем параметры. При выборе абсолютных ограничений диапазон  $V_0 + \Delta V$  по умолчанию совпадает с диапазоном изменения  $V_0$ . Он может быть оставлен таким или расширен. Параметры относительных ограничений задаются в процентах.

Флаг *Apply Zero Correction Constraints* доступен, только если в модуле FPV была заморожена скорость на некотором множестве ячеек. Если флаг поднят, эта информация будет использована, иначе – нет.

Составленное задание можно сохранить в пользовательском файле. Для этого в меню кнопки *Task* выбираем команду *Save as*. Загрузить задание из пользовательского файла можно командой *Load*. Независимо от этого, последнее задание в сеансе работы с модулем сохраняется всегда. Его можно загрузить командой меню *Load Last*. Для установки задания по умолчанию используем команду меню *Default*. Для изменения значения поля редактирования или поля-списка на значение по умолчанию используем клавишу F2, когда поле имеет фокус ввода.

## Выполнение

После щелчка по кнопке *Start* выводится диалог, отображающий ход выполнения (рис. 2). Он содержит два прогрессора.

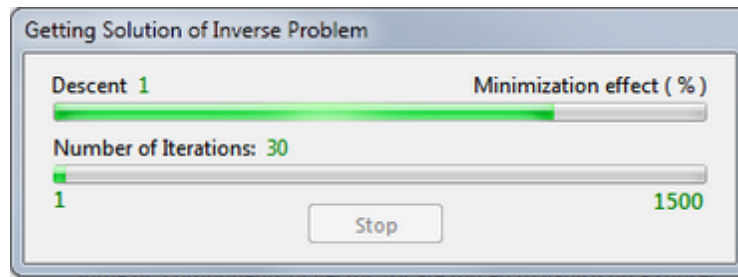


Рис. 2. Отображение хода решения обратной задачи.

Сначала первый прогрессор отображает этап подготовки данных. Затем оба отображают ход решения. Решение выполняется модулем FTI. Это сокращение фигурирует в некоторых сообщениях. Первый прогрессор отображает степень приближения в течение одного спуска (descent). Второй прогрессор выводит число выполненных итераций. Кнопка *Stop* прерывает выполнение. Решение завершается выводом сообщения о завершении. Типичные сценарии завершения таковы.

1. Успех. Выводится относительное уменьшение целевой функции.
2. Решение найдено, но уменьшение целевой функции является незначимым.
3. Начальное значение целевой функции близко к нулю. Уточнения не требуется.
4. Процесс прерван из-за превышения предельного числа итераций (user-defined limit number of iterations was exceeded), причем заданная точность решения не была достигнута.
5. Ошибка в ходе решения, либо решение увеличивает целевую функцию.

В случаях 1 – 3 уточненная скорость сохраняется вместе с информацией о задании и результатах решения обратной задачи. Просмотреть ее можно командой *Info on Inversion* меню Дерева обработки. Меню надо вызвать на новом *i*-узле.

Остальные случаи являются ошибочными. При выходе из IPS новый *i*-узел удаляется из дерева. Случай 4 при больших значениях предельного числа итераций (первые тысячи) свидетельствует о критической ситуации: при заданных значениях параметра регуляризации  $\alpha$  и точности решения задача становится некорректной. Следует увеличить  $\alpha$  и попробовать еще раз, не выходя из IPS. При изменении параметров или ограничений кнопка *Start* снова становится доступной.

### 3 Просмотр решения

Просмотр решения обратной задачи выполняет модуль Inverse Problem Viewer (команда *View Inverse Problem Solution* на *i*-узле). Графический модуль позволяет вывести bc[klye. vj]tkm? уточненную модель и карту относительных поправок  $\delta V$  (Difference Map). Это вектор с компонентами

$$\delta V_k = 100\% \cdot (\Delta V)_k / V_{0k},$$

где  $k$  – индекс ячейки в решетке. При запуске модуля на планшет выводится уточненная скорость  $V = V_0 + \Delta V$ . У модуля только одна новая команда в главном меню *Properties|Difference Map Settings*. Ей соответствует кнопка на панели инструментов с выпадающим меню. Она и является главным инструментом. Меню играет роль переключателя содержимого планшета с тремя опциями: уточненная (refined) скорость, начальная (initial) скорость и карта относительных поправок. Сама кнопка (как и команда главного меню) выводит диалог с настройками карты изменений (рис. 1а).

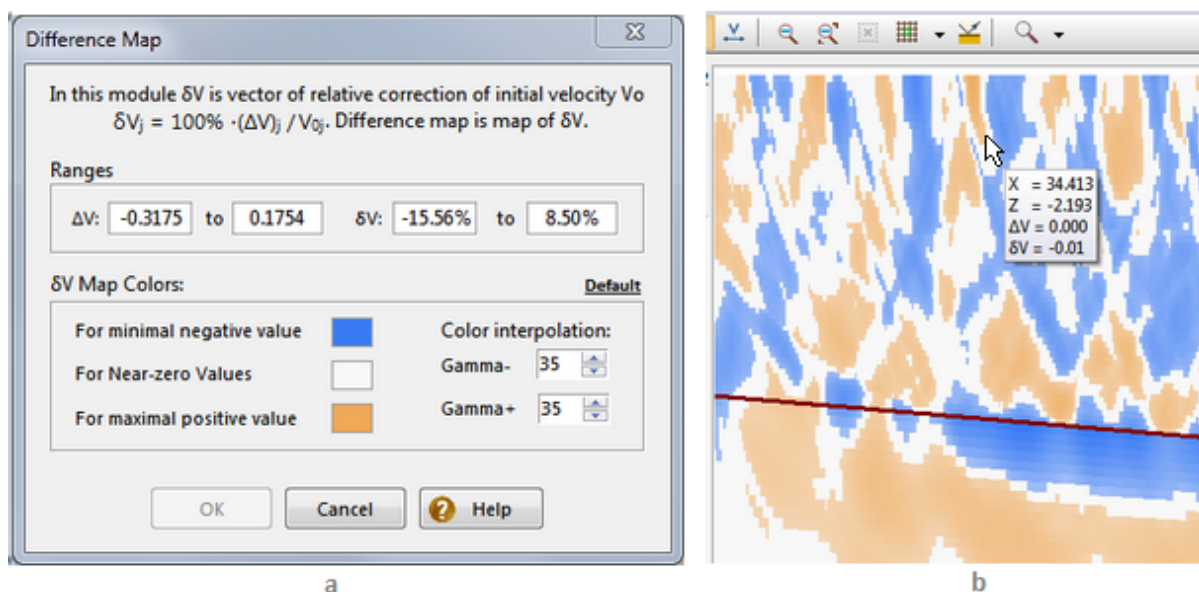


Рис. 1. Модуль Inverse Problem Viewer.

а – диалог для задания параметров карты; б – карта относительных поправок с подсказкой под курсором.

В верхней части диалога выведены диапазоны изменения компонент вектора поправок  $\Delta V$  и вектора относительных поправок  $\delta V$ . При выводе карты  $\delta V$  используются три опорных цвета: для минимальной отрицательной компоненты вектора  $\delta V$ ; для нулевого и близких к нулю компонент; для максимальной положительной компоненты. Цвет для произвольного значения  $\delta V$  в ячейке получается путем интерполяции между опорными цветами. Таким образом, на карте разными цветами изображаются ячейки, где скорость возросла при уточнении, и где – уменьшилась (рис. 1б). Параметры интерполяции  $\Gamma_{\text{Gamma-}}$  и  $\Gamma_{\text{Gamma+}}$  управляют смещением цветов к опорным цветам при интерполяции. Значение  $\delta V_k$  выводится на статусной панели, когда курсор находится над  $k$ -й ячейкой карты. При выводе подсказки под курсором доступно и значение  $\Delta V_k$  (рис. 1б).

Карту относительных поправок можно экспортировать в графический файл командой *File/Export Difference Map*. Для этого действуем, как в других [графических модулях](#).

## 4 Завершение цикла интерпретации

Решение обратной задачи томографии является последним шагом [цикла](#) в процессе кинематической интерпретации, но не является точкой выхода из него. Полученное решение требуется оценить. Процент падения целевой функции, о котором сообщает модуль IPS при завершении, имеет технический характер. Это свидетельство успешного решения математической задачи. Тем более, что целевая функция регуляризованной задачи отличается от нормы невязок. Объективной мерой найденного приближения могут служить только статистики невязок времен, полученных в результате *решения прямой задачи для уточненной модели*.

После решения обратной задачи томографии следует начать новый цикл интерпретации, выполнив следующие действия:

1. В Дереве обработки Менеджера проектов выделить  $i$ -узел с полученным решением и выполнить операцию копирования узла командой *Processing Tree/Copy Node*. В результате выполнения ко-



манды будет создан новый корневой узел Model с уточненной скоростью.

2. В Дереве выделить о-узел, который является предком  $i$ -узла и скопировать его как дочерний в новый корневой узел (команды *Copy Node, Paste O-Node*).
3. На вновь созданном о-узле выполнить решение прямой задачи для такого же задания, что и при решении прямой задаче в предыдущем цикле.
4. Изучить решение прямой задачи, в частности, статистики невязок времен и сопоставить их со статистиками на предыдущем цикле.
5. По результатам действия 4 принять решение о продолжении или завершении процесса.

# Построение сейсмических границ

## 1 Введение

Отраженная и головная волны несут разную информацию о среде. Отраженная волна является локальным сканером сейсмической границы (при небольших удалениях). Напротив, головная волна несет информацию о границе на больших и очень больших удалениях.

В рамках моделей, используемых в XTomo-LM, при определенных ограничениях, обе задачи формулируются и решаются в рамках одного аппарата – продолжения годографов вглубь среды (миграция) на уровне лучевого приближения, т.е. с использованием принципа Гюйгенса. Дифференциальным аналогом процедуры явилось бы решение задачи Коши для соответствующего эволюционного уравнения с начальными данными на линии наблюдения методом конечных разностей.

Процедуры решения задач обращения скрыты от пользователя. В пользовательском интерфейсе и протоколах решения фигурирует только понятие *эйконала*. Его следует понимать в следующем смысле: это функция  $T_R(x, z)$ , значение которой равно времени пробега волны от точки R до переменной точки  $(x, z)$ .

Точка R в этом определении играет роль параметра. Продолжение годографа и расчет эйконалов для каждого приемника R – тесно связанные задачи.

### Задача для отраженной волны

Для отраженной волны задача ставится так: на линии наблюдения задан годограф отраженной волны и положение источника, известно распределение скорости над отражателем. Требуется определить фрагмент отражателя. Для решения задачи рассматривается два синхронизированных процесса: распространение прямой волны от источника и миграция годографа. Сопоставляя кинематику обоих процессов, можно определить положение и конфигурацию отражателя. Обобщение этой задачи состоит в использовании большого числа источников и наблюдении большого числа годографов с целью осветить весь рефлектор под линией профиля. На практике имеет место именно эта ситуация. Данные такой задачи образуют систему годографов отраженной волны, освещающую, возможно с перекрытиями, горизонт в пределах наблюдения.

Наличие перекрытий в кинематическом анализе (в отличие от миграции сейсмических записей) не является принципиальным. Оно только предоставляет возможность выбора лучшего варианта. Во всяком случае, в алгоритмах, используемых в настоящей версии XTomo-LM, дело обстоит именно так. Более того, пользователю предоставляется специальный инструмент – модуль TX-Curve Selector – для отбора из совокупности годографов, содержащихся в SRT-данных, точнее в Каталоге лучей, тех годографов и определений таких удалений, которые дадут оптимальный результат. Понятно, что наиболее информативная часть годографа лежит на малых удалениях, поэтому пользователю предоставляется возможность ввести ограничения на удаления, чтобы использовать лучшие наблюдения и сократить ненужные перекрытия. При этом должно быть обеспечено полное освещение отражателя.

### Задача для головной волны

Рассматривается "классическая" постановка задачи. Дана пара встречных годографов  $T(R)$  и  $T^*(R)$  от источников  $S$  и  $S^*$ . Здесь R – приемник, звездочка относится к встречному годографу. Известно распределе-

ние скорости над преломляющим горизонтом (рефрактором). Требуется определить фрагмент рефрактора, "освещаемый" обоими годографами. Такая постановка задачи связана с известным соотношением (рис. 1), благодаря которому задача оказывается разрешимой.

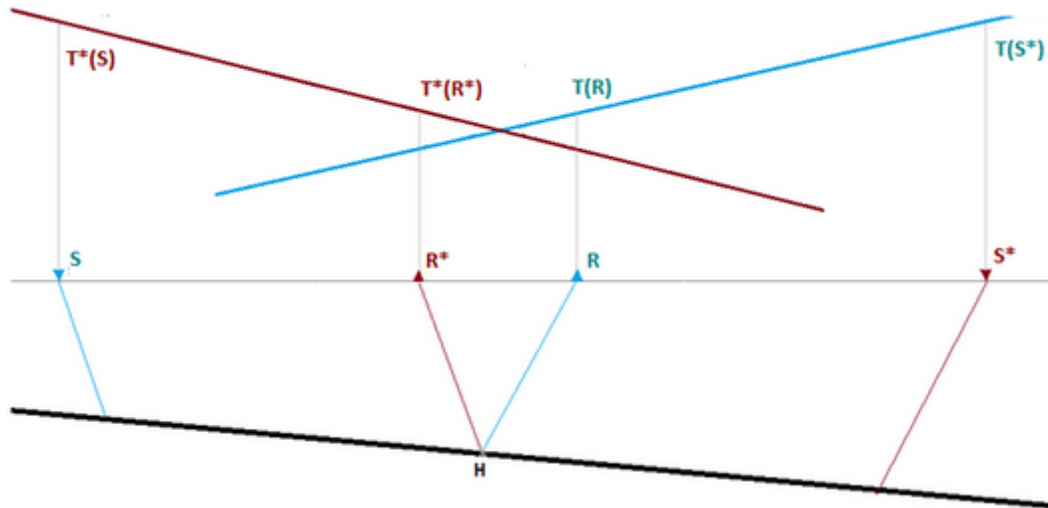


Рис. 1. Лучевая схема, поясняющая понятие взаимных точек.

Принимая, что волна скользит по границе, для любой ее точки Н имеем следующее соотношение между временами пробега:

$$T_{HR^*} + T_{HR} = T(R) + T^*(R^*) - T(S^*),$$

где в левой части стоит сумма времен по лучам HR и HR\*, которые выходят из точки Н под критическим углом. В силу принципа взаимности  $T(S^*) = T^*(S)$ , это значение называется взаимным временем (reciprocal time) пары встречных годографов. Приемники R и R\* называются взаимными (reciprocal) или сопряженными, а расстояние между ними – базой сопряжения (reciprocal points base).

Лучевая схема на рис. 1 показывает, что задача построения рефрактора эквивалентна задаче нахождения для каждого приемника R базы сопряжения (а, значит, сопряженного приемника на встречном годографе). Именно решение этой задачи реализует алгоритм, используемый в XТото-LM. Для оценки базы сопряжения сверху можно использовать видимые начальные точки годографов. Ведь истинная начальная точка является сопряженной к источнику.

Система годографов головной волны содержит множества нагоняющих прямых и встречных годографов. Из них с помощью модуля TX-Curve Explorer выбирается оптимальный набор годографов.

Определение конфигурации преломляющей границы и граничной скорости допускает лишь приближенное решение, поскольку не ясно, в какой мере физическая модель образования головной волны XТото-M, подходит к данной ситуации. Для плоских и почти плоских горизонтов применение разных физических моделей дает сходные результаты; именно границы с малой и медленно меняющейся кривизной удастся восстановить по наблюдаемым годографам.

### Алгоритмы обращения

Алгоритмы обращения систем годографов работают в предположении что *скорость в области, где залегает горизонт постоянна или имеет небольшой горизонтальный градиент*. Понятно, что в случае постоянной скорости в покрывающей среде алгоритмы применимы. В случае горизонтальной границы, условие, фактически, не накладывает ограничений и на переменную скорость. Если же горизонт имеет значительное падение или содержит структурные элементы, он занимает заметную по глубине область, и

тогда требование обнуления вертикального градиента на значительном отрезке глубины будет означать, что граница построена при скорости в покрывающей среде, существенно отличающейся от модели. Эта проблему удастся решить, используя технику с криволинейных решеток, которая делает общий случай очень похожим на случай горизонтальной границы. Таким образом, алгоритмы оказываются применимыми при произвольной (но достаточно регулярной) скорости в покрывающей толще.

Однако в любом случае требуется верификация результата путем решения прямой задачи. Хотя построение эйконалов и в прямой задаче, и при обращении проводится одними и теми же средствами, проверка не является тавтологией. При построении горизонта используются дополнительные идеи, которые, собственно и делают задачу обращения практически реализуемой и относительно быстрой.

Специальные разделы главы содержат примеры обращения годографов и оперирования с криволинейной решеткой как средства построения горизонтов.

### Решение, хранение, просмотр

Оба модуля Reflector Builder и Refractor Builder представляют результат в виде двух *итераций* горизонта: начальной и финальной. Оба алгоритма действительно реализуют последовательное приближение к решению, но отличие начальной итерации от последующих в том, что она устойчива. При ее построении не используется операций типа численного дифференцирования, которые в условиях шумовых данных могут проявить неустойчивость и привести к флуктуациям. В этом случае начальная итерация может оказаться полезной. Для плоской границы начальная и финальная итерации практически совпадают. В случае переменной кривизны горизонта точки начальной итерации смещены в сторону падения границы в данной точке, но общая конфигурация границы выявляется начальным приближением вполне удовлетворительно.

Построение горизонтов происходит на узле Дерева обработки Observations. Все горизонты, построенные в о-узле, складываются в одном хранилище – *базе данных горизонтов*. Это позволяет, в частности, сравнивать различные варианты построения. Горизонт идентифицируется кодом волны, номером варианта (Build) и номером итерации (0 или 1). Все содержимое базы данных горизонтов можно просмотреть на фоне модели с помощью графического модуля Horizon Previewer.

## 2 Подготовка годографов

Подготовка систем годографов к обращению выполняется в модуле TX-Curve Selector. Он запускается на о-узле командой *Select TX-Curves for inversion*. Модуль поддерживает всю функциональность программы просмотра годографов [TX-Curve Viewer](#). Дополнительные инструменты активизируются командой контекстного меню плоттера *TX-Curve Sample for Inversion*, которая выводит диалоги с описанием выборки годографов. Эти диалоги разные для отраженной и головной волны. Сама команда становится доступной при следующих условиях: (1) фильтр по источникам отключен; (2) фильтр по волнам "пропускает" только одну волну – ту самую, которая связана с будущим горизонтом. В контекстном меню списка волны нужный фильтр устанавливается командой *Hide All but Selected*. Наличие диалога на экране определяет особый режим программы, в частности, меняет работу плоттера. Все манипуляции, необходимые для подготовки, должны выполняться, когда диалог на экране или минимизирован. В последнем случае его можно восстановить командой вызова. Как только диалог закрывается, модуль превращается в TX-Curve Viewer.

### Отраженная волна

Прежде всего, для задачи обращения годографа отраженной волны прямой и встречный годографы не разделяются. Будем говорить просто о годографе отраженной волны, который может иметь левую и/или правую ветви. Подготовка предусматривает отбор оптимального набора годографов и ограничение уда-

лений. Годографы выборки должны обеспечивать незначительные перекрытия соответствующих фрагментов отражателя при минимально возможных удалениях. При формировании отражателя точки перекрытия ликвидируются по особому алгоритму, в котором точкам с минимальным удалениям всегда отдается предпочтение.

**Фильтр.** В списке волн отфильтруйте все волны, кроме нужной отраженной волны, как указано выше. В контекстном меню плоттера подайте команду *TX-Curve Sample for Inversion*. На экран выводится диалог *TX-Curve Sample for wave ...* (рис. 1). Его центральную часть составляет список или таблица – описание выборки. Колонками таблицы служат порядковый номер, ID источника (ключ упорядочения), x-координата источника и максимальное удаление. Источник однозначно определяет годограф.

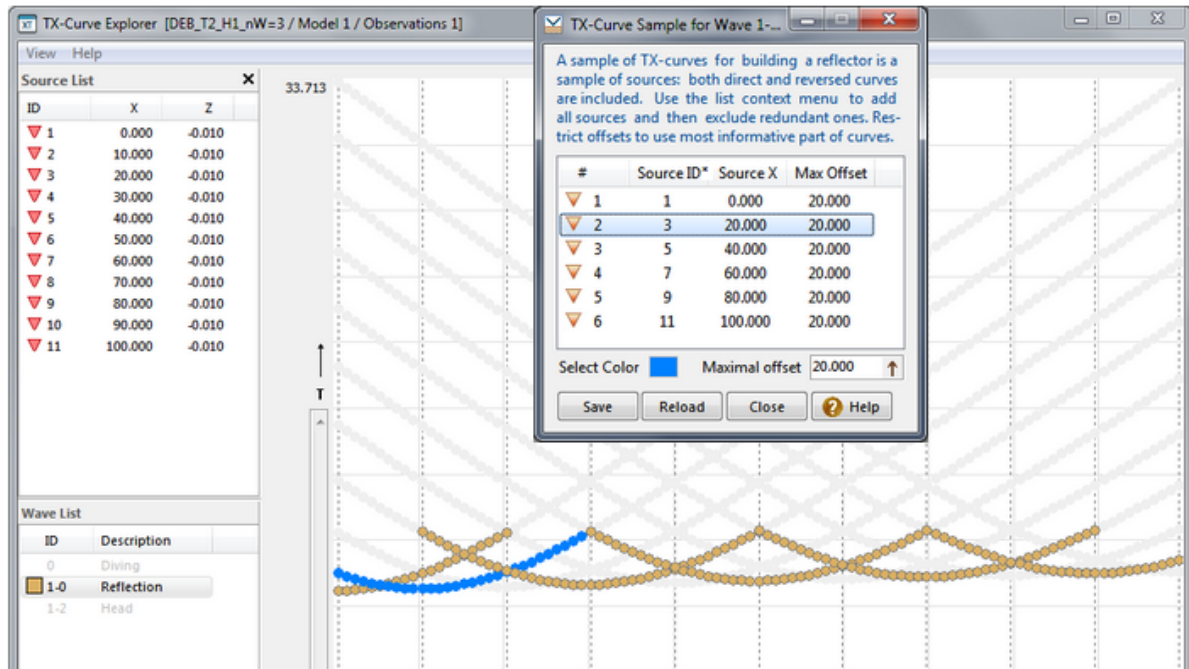


Рис.1. Составление выборки годографов для обращения. Звездочка в заголовке колонки указывает ключ упорядочения.

**Выборка.** При первом запуске диалоге таблица пуста. Управление осуществляется контекстным меню таблицы. Используя команду *Add All* (добавить все), заполните таблицу всеми годографами системы. Далее, используя множественное выделение и команду меню *Exclude Selected*, исключите из списка лишние строки.

Изменение состава выборки меняет картинку, которую выводит плоттер: годографы, входящие в выборку, выводятся с обычными атрибутами рисовки; исключенные же выводятся на заднем плане светло серыми, так что пользователь видит, что он выбирает. Команда-переключатель *Sample Display Mode* в меню таблицы обеспечивает или снимает такой режим вывода. Годограф, выделенный в списке, рисуется особым цветом выделения, который тут же в диалоге можно переопределить.

Добавлять годографы в выборку можно и непосредственно с плоттера. Отодвиньте окно выборки в сторону, если надо, захватите часть нужной кривой резиновым контуром и в рк-меню выберите команду *Add to Sample*.

**Удаления (офсеты).** Ограничения по удалениям могут задаваться индивидуально для каждого годографа и для любой их группы. Выделите в таблице годографы с одинаковым значением максимального удаления и перейдите в поле *Maximal offset*. Введите нужное удаление и щелкните по кнопке-стрелке. Значение

будет присвоено выделенным элементам списка. Значение максимального удаления 0.0 означает, что удаление может быть любым.

**Сохранение.** Кнопка *Save* диалога сохраняет описание выборки в файле в папке о-узла. При вызове диалога всегда загружается файл, отвечающий данной волне, если он существует. Чтобы отменить изменения, сделанные в списке после открытия, используйте кнопку *Reload* (загрузить файл) или выйдите из диалога без сохранения. Запуск *Reflector Builder* возможен только при обнаружении в папке о-узла файлов описания выборок.

## Головная волна

### Выборка годографов

Выборка годографов головной волны состоит из наборов прямых и встречных нагоняющих годографов. Набор прямых годографов должен удовлетворять следующим условиям:

- 1) годографы набора упорядочены по абсциссам источников; точки годографов упорядочены по х.
- 2) каждый годограф набора, начиная со второго, имеет в перекрытии с предыдущим годографом не менее  $m$  точек;
- 3) абсциссы последних точек годографов должны монотонно возрастать (годограф не перекрывается полностью предыдущим).

В условиях для встречных годографов условия 2) и 3) выглядят так:

- 2) каждый годограф набора, кроме последнего, имеет в перекрытии с последующим годографом не менее  $m$  точек;
- 3) абсциссы первых точек годографов должны монотонно возрастать (годограф не перекрывается полностью последующим).

Значение  $m$  в выпуске 3.0.2 равно 6.

### Построение

Диалог *TX-Curve Sample* для головной волны показан на рис. 2. Он содержит списки описаний, которые при первом запуске для данной волны пусты.

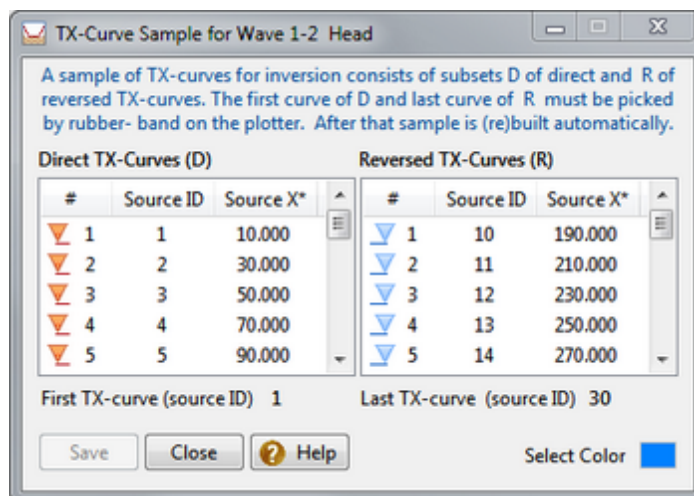


Рис.2. Выборка годографов головной волны для обращения. Звездочка в заголовке колонки указывает ключ упорядочения.

Выборки годографов строятся автоматически по команде пользователя, причем наборы прямых и встречных строятся независимо. В команде для построения набора прямых годографов пользователь должен

указать первый прямой годограф, а в команде для набора встречных – последний встречный. Делается это так. Отодвиньте диалог в сторону и выделите на плоттере прямой годограф. В меню плоттера выберите команду *Set as First Direct curve* (Считать первым прямым годографом). По этой команде строится или перестраивается описание прямых годографов. Если выделить встречный годограф, – строится или перестраивается описание встречных годографов. После построения описание выборки сохраняется кнопкой *Save* или при попытке закрыть диалог. Изображение выборки на плоттере устроено так же, как в случае отраженной волны.

### 3 Построение рефлектора

После составления выборки годографов для обращения (см. Подготовка годографов) командой меню *Build Reflector* на о-узле запускается модуль Reflector Builder (рис. 1). Оставляя рекомендации до следующего раздела, перечислим формально действия пользователя.

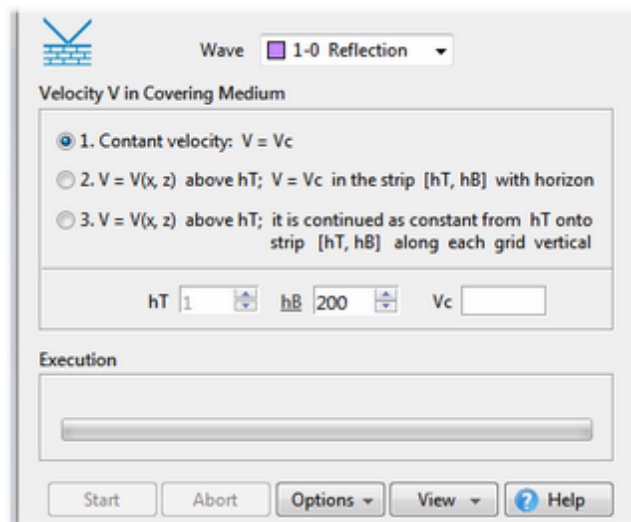


Рис. 1. Главное окно модуля Reflector Builder

#### Скорость $V'$ в покрывающей среде

Задание скорости в покрывающей среде – главная забота пользователя. Имеется три опции задания скорости, и они тесно связаны с условиями применимости [алгоритмов](#) обращения. Вопрос о том, как применять опции, будет рассмотрен в других разделах. Здесь они описываются формально. Как везде,  $V(x, z)$  означает скорость в данной модели;  $[hT, hB]$  обозначает полосу решетки с верхней  $h$ -линией номер  $hT$  и нижней номер  $hB$ ;  $mB$  – это номер предпоследней линии решетки. Опции выбора скорости таковы:

1. Постоянная скорость:  $V' = V_c$  в полосе  $[1, hB]$ , где  $hB$  – это  $h$ -линия, ограничивающая полосу, в которой лежит горизонт, снизу.  $hB$  и  $V_c$  задаются пользователем, их значения вводятся в поля с идентичными именами. По умолчанию,  $hB = mB$ . Щелчок по ссылке  $hB$  устанавливает это значение. Задание значения, меньшего  $mB$ , сокращает время счета. В качестве  $V_c$  можно, например, взять среднее значение скорости в выделенной подобласти решетки (оно выводится как  $V^*$  под планшетом после выделения).
2.  $V' = V(x, z)$  в полосе  $[1, hT]$  и  $V' = V_c$  в полосе  $[hT, hB]$ . Здесь  $hT$  –  $h$ -линия, лежащая выше горизонта,  $hB$  – ниже. Таким образом, горизонт расположен целиком в полосе  $[hT, hB]$ .  $hT$ ,  $hB$  и  $V_c$  вводятся пользователем в поля с теми же именами.

3.  $V' = V(x, z)$  в полосе  $[1, hT]$  и продолжена в полосу  $[hT, hB]$  как постоянная на каждой вертикали. Продолжение производится программой.  $V'$  не является постоянной в  $[hT, hB]$ , если  $V(x, z)$  имеет ненулевой горизонтальный градиент.  $hT$  и  $hB$  вводятся пользователем в поля с теми же именами,  $V_c$  не задается.

Заметьте, что скорость  $V'$ , с которой строится горизонт, отличается от скорости в модели ( $V$ ). Это открывает широкие возможности для экспериментирования прямо в рамках графа обработки.

### Задание

Выбор скорости только одно из действий, которые пользователь должен совершить для запуска сеанса обращения. Вот полный список:

1. Выбор волны из выпадающего списка *Wave*. В нем представлены те отраженные волны, для которых в о-узле обнаружены описания систем годографов.
2. Выбор скорости в покрывающей среде. Заполнение полей  $hT$ ,  $hB$ ,  $V_c$ , если нужно.
3. Изменение выборки годографов для текущего сеанса обращения (если нужно). Щелчок по кнопке *Options* выбрасывает меню; выберите в нем команду *TX-Curve Set*. На экран будет выведен диалог со списком годографов для обращения, в точности такой же как в модуле [TX-Curve Selector](#). Пользователь может изменить состав выборки и максимальные удаления для текущей сессии обращения.
4. Настройка параметров. В меню кнопки *Options* выберите команду *Parameters*. Она выводит диалог, показанный на рис. 2. На панели *Algorithm* следует выбрать значения для двух параметров, влияющих на работу алгоритма и результат обращения. Первый параметр – априорная информация о наклоне (*slope*) горизонта. Сначала всегда следует использовать значение по умолчанию. Значение  $20^\circ$  годится для большинства прикладных задач. Увеличивать его значение надо только тогда, когда полученный результат дает основание полагать, что локальные наклоны кривой искусственно занижены. Выбор большего значения снимает ограничение, но не исключает появления флуктуаций. Параметр для дифференцирования горизонта практически никогда не нуждается в корректировке. О параметре на панели *Execution* см. ниже.

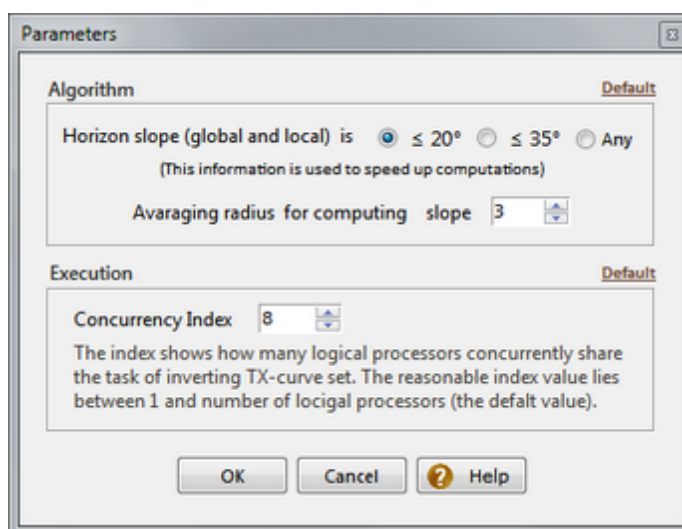


Рис. 2. Диалог задания параметров выполнения.

### Выполнение



Сеанс обращения открывается щелчком по кнопке *Start*. Рефлектор либо строится впервые, либо строится какая-либо новая версия (*Build*). Модуль сам нумерует версии горизонтов, построенных для данной волны. Номер версии выводится на панели *Execution* главного окна после щелчка по кнопке *Start*.

Модуль рассматривает обращение одного годографа как элементарную задачу и запускает для ее решения особый модуль. Результатом его работы является фрагмент рефлектора. Элементарная задача закрепляется за логическим процессором вычислительной системы. Параллельно выполняется столько задач, сколько указано параметром *Concurrency index* в диалоге задания параметров (рис. 2). По умолчанию, он равен числу логических процессоров в системе. При выполнении задания над полосой прогрессора указываются ID источников, годографы которых обрабатываются в данный момент. Полученные при решении элементарных задач фрагменты "сшиваются" в единый горизонт.

### Просмотр результата и экспорт

Результатами сеанса являются протокол (*log*), и, в случае успеха, две итерации рефлектора, записанные в базу данных горизонтов. Просмотр протокола и горизонта осуществляется командами меню, которое выбрасывает кнопка *View*. Все протоколы складываются в папке о-узла, так что по команде *View/Logs* выводится их список. Имя протокола начинается со времени создания и завершается кодом волны и версии. Список упорядочен по времени. Он имеет контекстное меню с командами просмотра и удаления. Как всегда, открыть протокол можно двойным щелчком.

Для предварительного просмотра горизонта запускается специальный модуль *Horizon Previewer (HPV)*. Запускается он командой *View/Horizon*. Это графический модуль, который выводит изображение модели и позволяет поверх него изобразить все горизонты из базы данных горизонтов, так что, фактически, HPV – это средство визуализации базы данных горизонтов (рефлекторов и рефракторов). Кстати, он дает возможность просмотреть и протокол построения каждой границы. На рис. 3 показан фрагмент главного окна HPV.

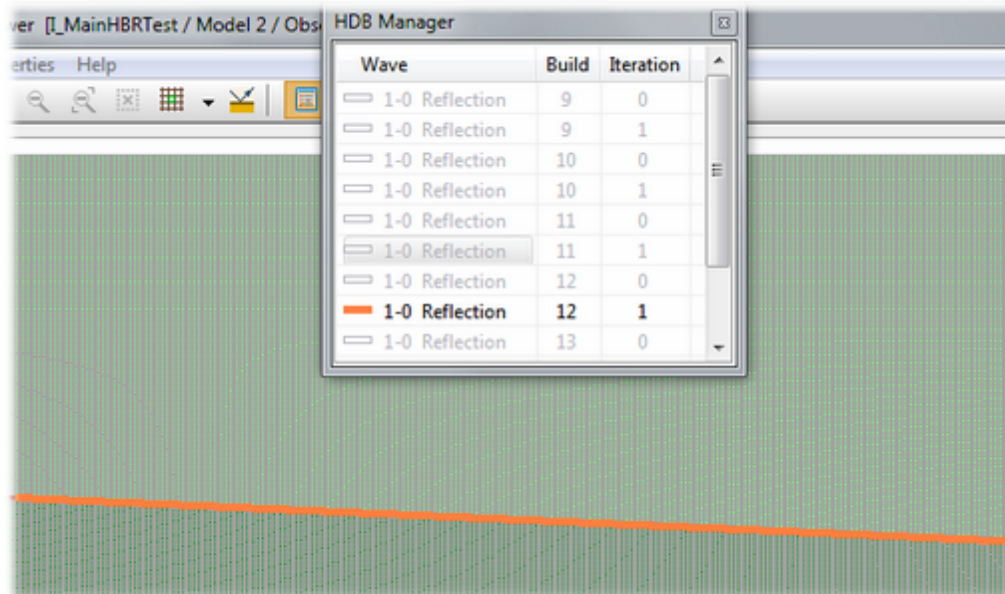


Рис. 2. Главное окно HPV с окном Менеджера базы данных горизонтов.

В центре сверху выведено **окно менеджера базы данных** (*HDB Manager*). Если окно Менеджера закрыто, то вызвать его можно командой *View/Horizon Database Manager* или кнопкой панели инструментов. Мене-

джер состоит из списка горизонтов базы данных и контекстного меню. Список допускает множественное выделение, позволяющее работать с группами элементов. Колонки списка содержат описание волны (Wave), версию горизонта (Build) и итерацию (Iteration). Строки списка выводятся черным цветом, если соответствующая граница отрисована плоттером (на рис.3 – одна кривая) и серым – если нет. Функциональность Менеджера реализована его контекстным меню (таблица 1).

Таблица 1. Команды Менеджера базы данных горизонтов

Команда	Описание
<i>Draw</i>	Плоттер выводит выделенные в списке горизонты. Двойной щелчок выводит или скрывает одну кривую.
<i>Hide</i>	Плоттер скрывает выделенные в списке горизонты.
<i>Boundary Velocity</i>	Команда присутствует в меню, если выделенный горизонт – рефрактор. Вызывает диалог с графиком граничной скорости. Планшет, на котором он изображен, имеет контекстное меню, позволяющее сгладить граничную скорость и вывести ее в текстовый файл.
<i>Change Color</i>	Изменить цвет. Позволяет установить цвет, выбранный в диалоге Windows, для рисовки выделенных в списке кривых.
<i>Heavy Line</i>	Выводит выделенные в списке кривые жирной линией.
<i>Ordinary line</i>	Выводит выделенные в списке кривые обычной линией.
<i>Display Build Log</i>	Выводит протокол построения выделенного горизонта.
<i>Refresh List</i>	Обновляет список, считывая заново базу данных (см. ниже).
<i>Export to MG File</i>	Выводит выделенные границы в файл формата <b>MG</b> .
<i>Delete Selected</i>	Удаляет выделенные в списке кривые из базы данных горизонтов.

Если в одном сеансе Reflector Builder строится несколько версий горизонта, то HPV можно не закрывать. Чтобы увидеть в нем вновь построенную версию, можно либо заново использовать команду *View/Horizon*, либо в Менеджере базы данных применить команду *Refresh List*.

### Просмотр базы данных горизонтов из Менеджера проектов

Меню Дерева обработки не содержит прямой команды вызова HPV. Чтобы просмотреть базу данных горизонтов на любом о-узле, следует запустить Reflector Builder (или Refractor Builder) и использовать команду *View/Horizon*, как описано выше. Менеджер проектов позволяет запускать оба модуля на всех о-узлах с описаниями выборки годографов, но выполнить обращение можно только на одном узле, на том, где запущена первая копия модуля, остальные используются только для просмотра.

## 4 Построение рефрактора

Запуск Refractor Builder осуществляется командой меню *Build Refractor* на о-узле. Хотя задачи обращения годографов отраженной и головной волн различны и подготовка годографов к обращению происходит по-разному, пользовательский интерфейс обоих модулей и действия пользователя почти одинаковы. В частности, опции задания скорости в покрывающей среде выбираются одинаково. В главном окне Refractor есть дополнительная панель *Reciprocal Points Base* (рис. 1).

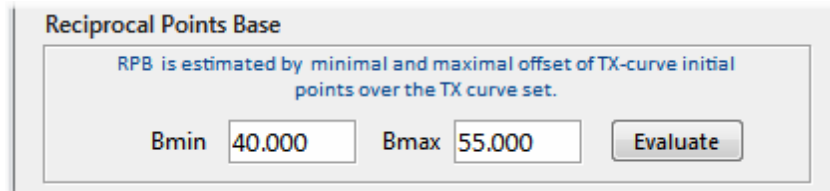


Рис. 1. Панель для оценки базы сопряжения.

Согласно [Введению](#) суть алгоритма обращения – поиск взаимной точки встречного годографа для каждой точки прямого. Для решения этой задачи важно иметь примерную оценку базы сопряжения. Такую информацию могут нести начальные точки годографов, входящих в выборку для обращения. Начальная точка является сопряженной для источника. Видимая начальная точка годографа на сейсмической записи может лежать гораздо дальше от источника, чем истинная, но все же это важный ориентир. При щелчке по кнопке *Evaluate* (оценить) модуль вычисляет минимальное и максимальное значение базы начальной точки для всех участвующих годографов. Если пользователь способен задать их точнее, он может это сделать: поля, в которые выводятся оценки, можно редактировать. В некоторых случаях неточность оценок выясняется в ходе обращения, и тогда пользователь получает соответствующие рекомендации.

Поиск взаимных точек требует перебора большого числа вариантов, поэтому Refractor Builder заранее вычисляет [эйконалаы](#)  $T_R(x, z)$  для всех участвующих приемников R и делает это, распределяя работу между имеющимися в системе логическими процессорам. При щелчке по кнопке *Start* эта операция выполняется первой и занимает большую часть времени.

**Диалог параметров** модуля содержит всего два параметра: радиус усреднения для вычисления производной и индекс параллельности. Последний используется только при вычислении эйконалов: именно эта операция распределяется между логическими процессорами.

После завершения сеанса обращения действия пользователя не отличаются от случая отраженной волны: просмотр протоколов, просмотр построенного горизонта в модуле *Horizon Previewer*. Преломляющие и отражающие горизонты помещаются в одну и ту же базу данных. Модуль Refractor Builder рассчитывает дополнительно *границную скорость* – важнейшую характеристику головной волны. Она также сохраняется в базе данных горизонтов, а Менеджер базы имеет специальную [команду](#) для ее просмотра и экспорта.

## 5 Пример 1: Постоянная скорость

Примеры в этом и следующем разделе преследуют не методическую, а техническую цель: продемонстрировать работу модулей построения горизонтов. Коль скоро речь идет о построении горизонтов, модель является слоистой. Изучение слоистой модели происходит по слоям сверху вниз, между тем как скорость с самого начала должна быть задана на всей решетке. Это временное противоречие является чисто формальным. Оно снимается по мере изучения слоев. При изучении слоя важны только значения скорости в

области от линии наблюдения до его подошвы. Значения скорости ниже его подошвы задаются формально. В этом разделе рассматривается несколько искусственная задача о построении линий раздела трехслойной модели с известными постоянными пластовыми скоростями.

### Исходные данные

Наблюденные SRT данные представляют собой две системы годографов отраженных волн, отвечающие двум границам раздела трехслойной модели с пластовыми скоростями  $V_1 = 3.0$ ,  $V_2 = 4.5$ ,  $V_3 = 6.0$ . Допустим, что начальная модель хранится в узле Model 1, а SRT-данные импортированы в дочернем узле Observation 1. Входные данные показаны на рис. 1.

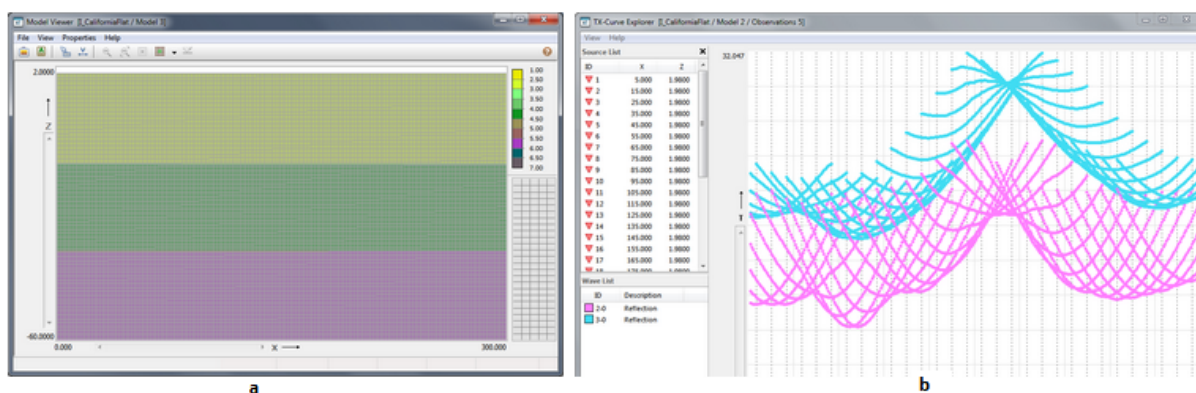


Рис. 1. Исходные данные. а – начальная модель в m-узле (модуль Model Viewer); размер решетки 299x246.

Скорость задана формально, поскольку линии раздела слоев неизвестны.

б – Импортированные SRT-данные в виде двух систем годографов (модуль TX-Curve Viewer).

### Решение

Задача построения горизонта состоит из двух шагов: (1) обращение системы годографов и (2) встраивание полученной кривой в решетку. Сначала строим горизонт, отвечающий волне 2-0.

#### Горизонт 1: волна 2-0.

Шаг 1. Запускаем модуль TX-curve Selector (команда *Select TX-Curves for Inversion*) на o-узле, устанавливаем фильтр для волны 2-0 и формируем описание выборки годографов. Включаем в нее все годографы, и для всех ограничиваем удаления величиной 15. Сохраняем описание и закрываем программу. Запускаем модуль Reflector Builder на том же узле. Выбираем опцию определения скорости 1: постоянная скорость и полагаем  $V_c = 3$ . Нижняя граница полосы горизонта  $hB = 130$ . Сеанс обращения приводит к отражателю, финальная итерация которого показана на рис. 2а. Экспортируем кривую в файл MG командой меню Менеджера базы данных горизонтов.

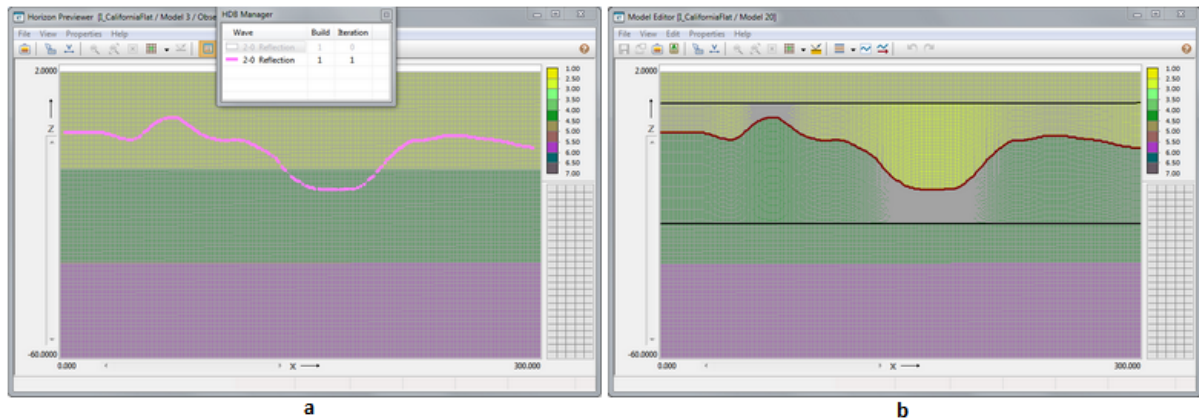


Рис. 2. Построение первого отражателя.

а – результат обращения, визуализированный модулем Horizon Previewer.

б – горизонт встроен в решетку (узел Model 2) и совпадает с h-линией 59; черные линии ограничивают GPA; скорость выше горизонта положена равной 3; цветные неоднородности связаны со сгущением и разряжением h-линий.

Шаг 2. В Менеджере проектов создаем копию узла Model 1 с именем Model 2. На новом узле запускаем редактор модели MED. Определяем область возмущения модели (GPA) интервалом номеров h-линий [28, 130]. Используем команду главного меню *Edit/Import Inner H-line* и задаем в качестве источника импорта созданный на шаге 1 файл формата MG. Результат операции показан на рис. 2б. Первый горизонт совпадает с h-линией 79. Выделяем первый слой модели и полагаем в нем скорость равной 3.

### **Горизонт 2: волна 3-0.**

Шаг 1. Копируем узел Observation 1 в узел Model 2. Далее работаем с новым о-узлом M2/O1 и системой годографов волны 3-0. В модуле TX-curve Selector включаем в выборку годографов для обращения все годографы с ограничением на офсеты 30. Сохраняем выборку. Запускаем Reflector Builder. В отличие от первого горизонта, выбираем опцию определения скорости 2:  $V = V(x, z) = 3$  до h-линии 59,  $V = 4.5$  в полосе [59, 246]; h-линия 59 является первым горизонтом. Результат сеанса обращения показан на рис. 3а. Экспортируем кривую в MG-файл.

Шаг 2. Для встраивания кривой в модель создаем копию узла Model 2 с именем Model 3. Запускаем на узле Model 3 модуль редактирования MED. Положив GPA = [77, 246], импортируем кривую, сохраненную на шаге 1. Результат операции показан на рис. 3б. Второй горизонт совпадает с h-линией 164.

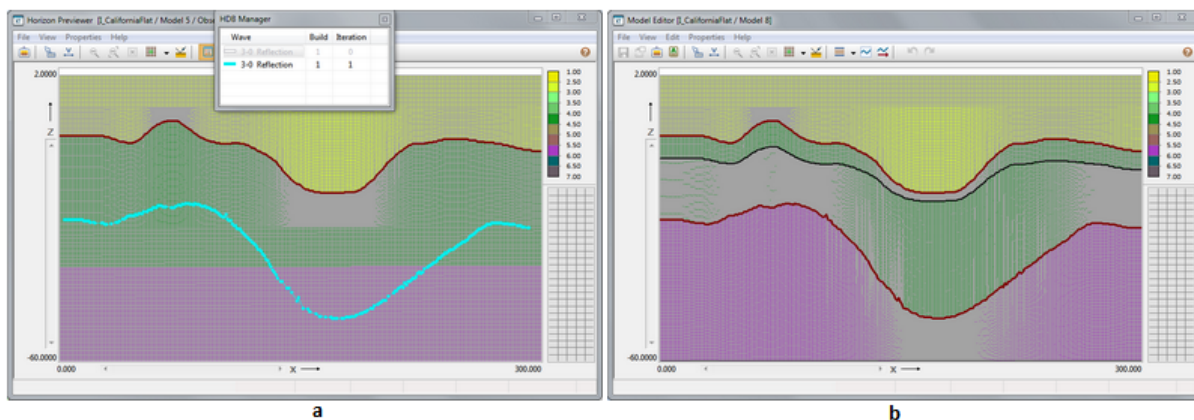


Рис. 3. Построение второго отражателя.

а – результат обращения, визуализированный модулем Horizon Previewer.

б – горизонт встроен в решетку (узел Model 3, Model Editor) и совпадает с h-линией 164; черная линия - верхняя граница GPA (77), нижняя совпадает с дном модели; скорость выше горизонта положена равной 4.5, ниже горизонта – 6.

Рис. 4а совпадает с Рис. 3б, в котором линии решетки сделаны невидимыми. Это окончательный результат восстановления модели. Теперь требуется верификация. Надо решить прямую задачу и изучить невязки времен. В данном случае этого можно не делать. Дело в том, что SRT данные не являются наблюдаемыми. Они получены путем моделирования. Исходная модель вместе с выборкой лучей показана на рис. 4б.

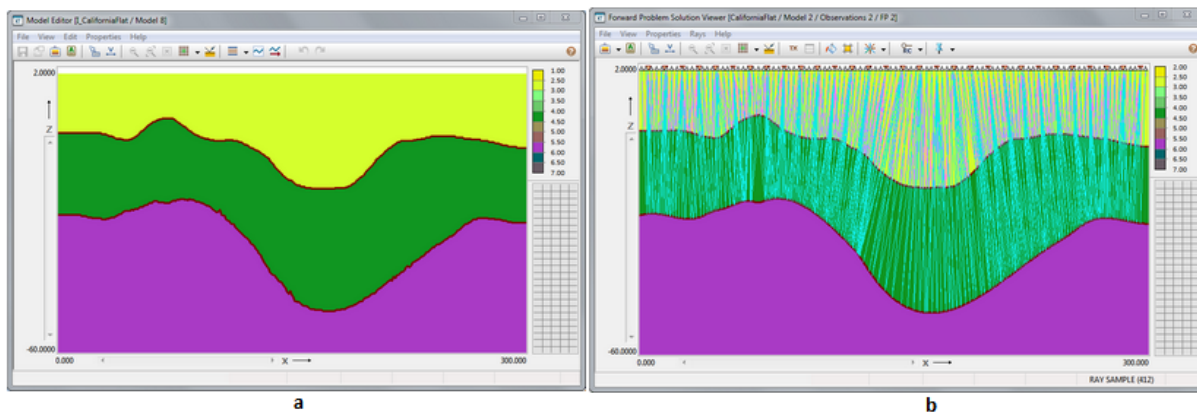


Рис. 4. Верификация восстановленной модели.

а – изображение рис. 3б без линий решетки. б – Решение прямой задачи для модели, послужившей источником SRT-данных; показана небольшая выборка лучей (Forward Problem Viewer).

Таким образом, достаточно сравнить исходные горизонты на рис. 4б с горизонтами на рис. 4а. Аккуратное сравнение дает среднеквадратическое значение для относительной ошибки порядка 0.6%. Это приемлемая ошибка для численного эксперимента, подтверждающая эффективность алгоритма обращения годографов отраженной волны в случае постоянных пластовых скоростей.

### Комментарий

Точки горизонта всегда являются узлами решетки. Поэтому результат получается тем точнее, чем ближе форма h-линий к форме границы. В начале последняя нам не известна, поэтому разумно начинать с орто-

гональной решетки. В приведенном примере решетка густая и освещение границ годографами хорошее, поэтому никаких дополнительных действий не предпринималось, хотя на втором горизонте заметны флуктуации. Если таких осцилляций много, уместно провести еще одну итерацию: удалить построенный горизонт, но сохранить решетку, образовавшуюся при импорте горизонта. Повторное построение границы на "родной" решетке увеличит точность построения. Дополнительно можно сгладить границу после имплантации.

На рабочей станции с процессором Intel Core i7-2600K 3.4МГц с 8 логическими процессорами время одного сеанса обращения для первой границы составило 52 секунды, для второй – 2 минуты 31 секунду. Для всех примеров этой главы время обращения не более 3 минут.

## 6 Пример 2: Градиентный слой (рефлектор)

Требуется построить отражающий горизонт с градиентной скоростью в покрывающей среде. Согласно введению, скорость может быть переменной, но только выше области, в которой лежит горизонт. Если он имеет значительное падение на профиле, то область эта может быть столь значительной по глубине, что замораживание вертикального градиента в ней нельзя оправдать физически. Нижеследующий пример демонстрирует технику обращения в этом случае.

Пусть скорость в покрывающей среде имеет вертикальный градиент, который в пересчете на всю глубину модели (рис. 1а) соответствует линейному изменению скорости от 2.7 до 7.0 (узел Model 1). Система годографов отраженной волны приведена на рис.1б. Импортирована в узел M1/O1.

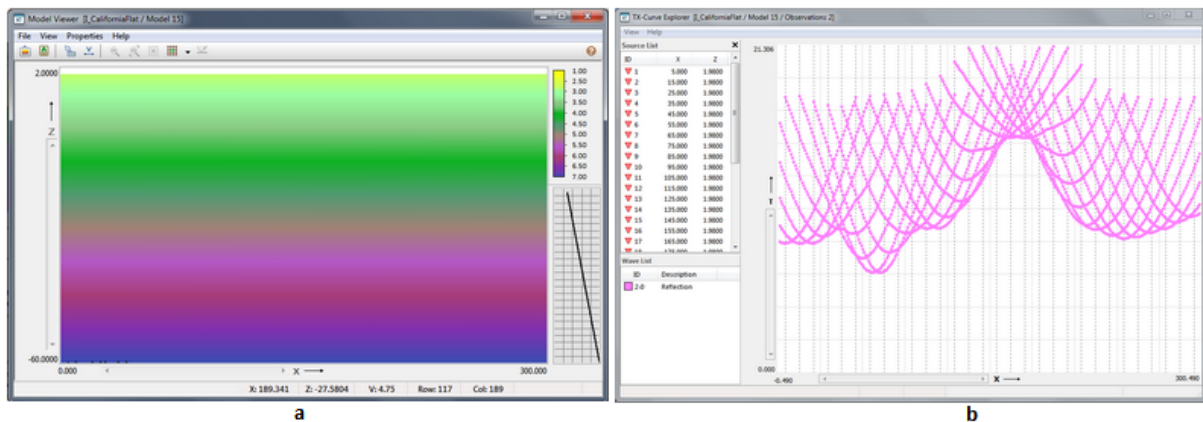


Рис. 1. Исходные данные. а – начальная модель в  $m$ -узле Model 1 (модуль Model Viewer); размер решетки 299 x 246. Линии решетки скрыты. Скорость пересчитана на всю модель как линейная функция  $z$ .

б – Импортированные в узел M1/O1 SRT-данные в виде системы годографов отраженной волны (модуль TX-Curve Viewer).

### Решение

Построим сначала первое приближение к горизонту, считая скорость постоянной  $V = V_c$ . Форма границы будет, в общих чертах, похожа на истинную. Встроенное в модель приближение изменит форму решетки, приблизив ее  $h$ -линии к целевому горизонту. Тогда обнулить вертикальный градиент скорости будет достаточно в узкой полосе над границей.

### Первое приближение

Положим  $V_c = 3$ . Это приблизительно среднее значение скорости до глубины 25. Два шага построения показаны на рис. 2.

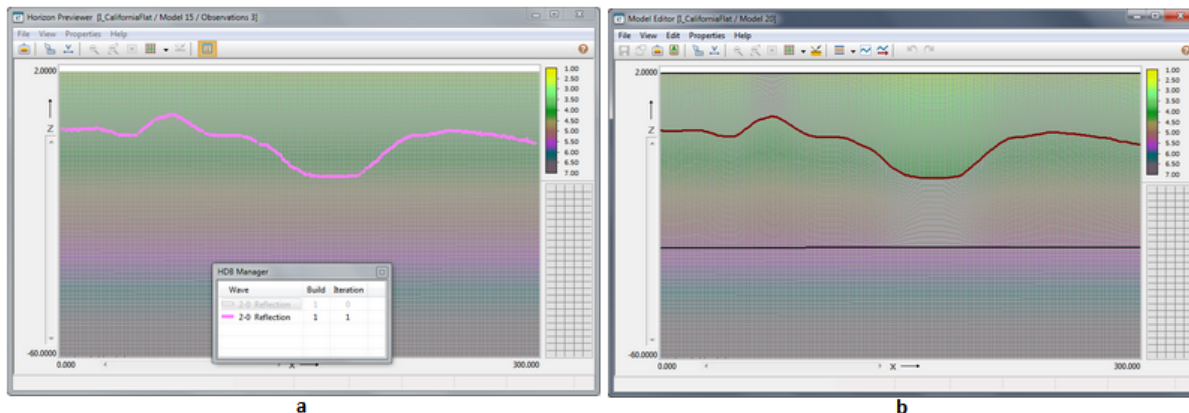


Рис. 2. Построение первого приближения с постоянной скоростью  $V = 3$  в покрывающей среде.

- a – результат обращения, визуализированный Horizon Previewer. HPV показывает горизонт, построенный с  $V=3$ , на модели со скоростью  $V(x, z)$ .
- b – горизонт встроен в решетку (узел Model 2) и совпадает с h-линией 59; черные линии ограничивают GPA; подробности в тексте.

После встраивания в модуле MED горизонт совпал с h-линией 59. Он сглажен (метод скользящих средних с радиусом усреднения 2), чтобы решетка стала регулярной. Мы помним, что при изменении решетки скорость в GPA **меняется**. Поэтому мы восстановили ее, заменив скоростью из узла Model 1 командой *Edit/Replace velocity*. Первое приближение в дальнейшем будет удалено.

### Второе приближение

Скопируем узел M1/O1 в M2/O1 и построим горизонт, используя в Reflector Builder опцию задания скорости 3:  $V = V(x, z)$  вплоть до h-линии 58 и продолжена вниз по вертикалям как постоянная. Результат построения и встраивания показан на рис. 3.

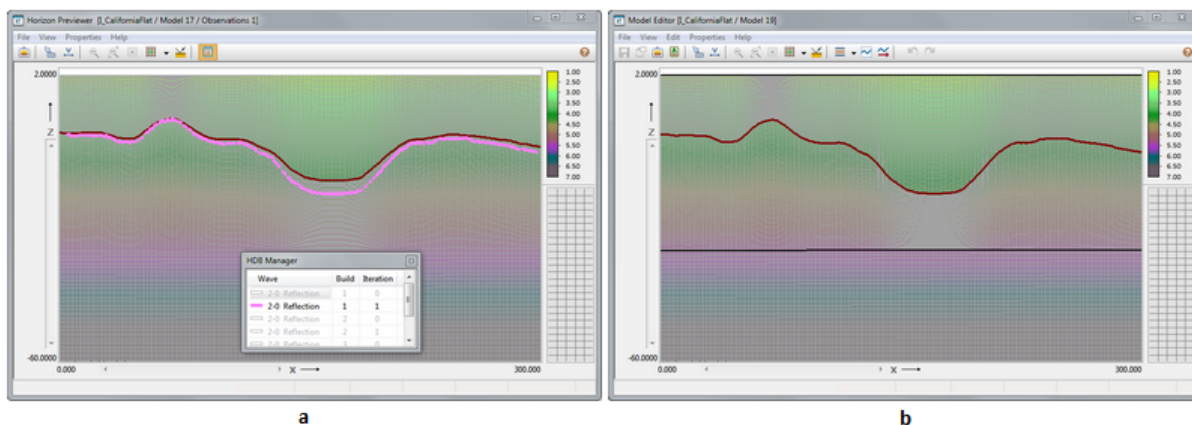


Рис. 3. Построение второго приближения с опцией скорости 3: скорость продолжена вниз как постоянная с h-линии 58.

- a – результат обращения, визуализированный Horizon Previewer.
- b – горизонт встроен в решетку (узел Model 3) и совпадает с h-линией 66; черные линии ограничивают GPA; подробности в тексте.



Модуль Horizon Previewer показывает построенную границу на фоне текущей модели Model 2, с которой еще не удалено первое приближение (рис. 3а). Это дает возможность увидеть эффект замены градиентной скорости на среднюю: граница задирается вверх и чем глубже она залегает – тем больше. Интервал h-линий, в котором скорость изменена [58, 66]. На дне впадины это не более 3 единиц глубины. Узел Model 3 скопирован в Model 4, в нем первое приближение удалено и произведен импорт второго приближения (рис. 3б), GPA = [1, 150]. Граница сглажена, скорость восстановлена, как и выше.

### Верификация

Рис. 4а повторяет рис. 3б без линий решетки. Рис. 4б показывает результат моделирования, в ходе которого были получены исходные годографы для задачи обращения. Ошибка восстановления горизонта составляет 0.8%.

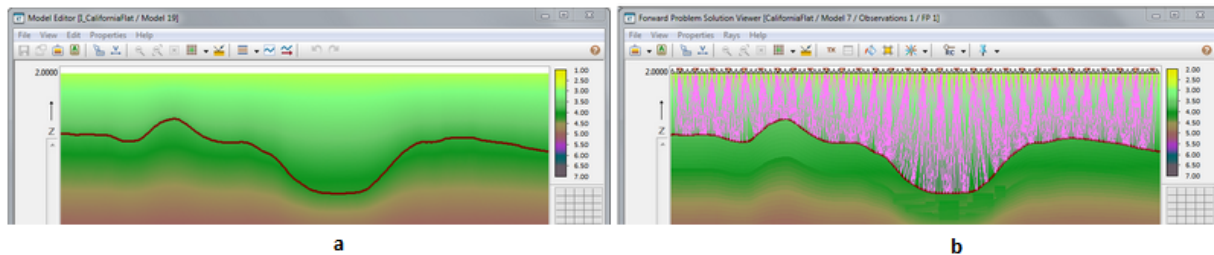


Рис. 4. Верификация построенного горизонта.

а – верхняя часть изображения рис. 3б без линий решетки.

б – решение прямой задачи для модели, послужившей источником SRT-данных; показана выборка лучей (Forward Problem Viewer).

## 7 Пример 3. Градиентный слой (рефрактор)

Требуется построить преломляющий горизонт, являющийся подошвой градиентного слоя. В предыдущем разделе показан один подход к проблеме. Однако он не может быть непосредственно перенесен на данный случай. Дело в том, что средняя скорость не является подходящей заменой неоднородного слоя для головной волны (в этом случае используют различные эффективные скорости).

Вместо этого, используем другой, более общий подход. Мы восстановим преломляющую границу методом последовательных приближений, в котором на каждом шаге используется Refractor Builder с опцией определения скорости 3: скорость продолжается как постоянная вниз с h-линии номер J, лежащей выше горизонта. Если скорость возрастает с глубиной, J будет возрастать, а горизонты-итерации будут опускаться, пока не достигнут истинного положения рефрактора.

Начальная модель показана на рис. 1а. Скорость известна приблизительно до глубины 20 и продолжена до нижней границы модели -40 с сохранением вертикального градиента. Скорость имеет небольшой горизонтальный градиент. Длина профиля – 600. На этом и последующих снимках линии решетки скрыты, поскольку при данном масштабе они полностью перекрывают модель. Система годографов головной волны, импортированная в узел M1/O1, загружена в модуль TX-Curve Selector. По ней построена [выборка годографов](#) для обращения (рис. 1б).

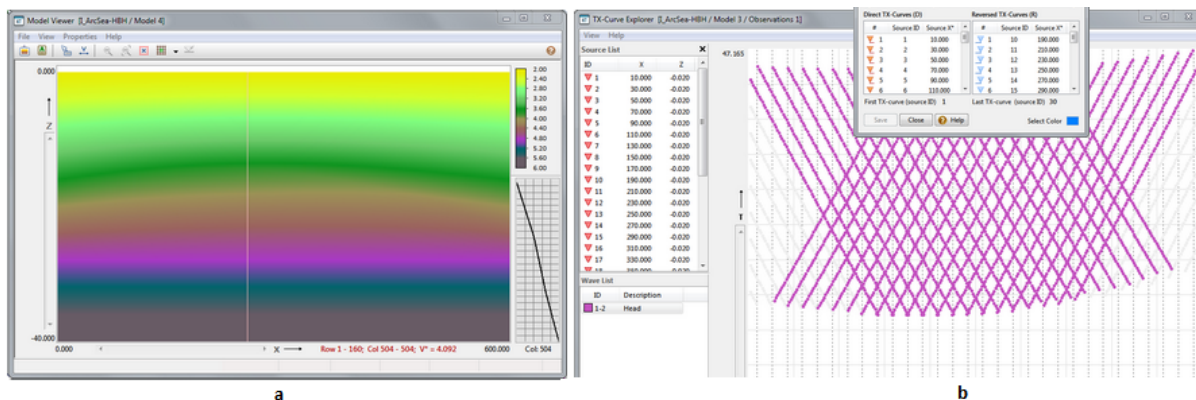


Рис. 1. Исходные данные. а – начальная модель в  $m$ -узле Model 1 (модуль Model Viewer); размер решетки 1200 x 160.

Одна из колонок решетки выделена, чтобы показать профиль скорости. Он немного меняется вдоль профиля. б – Система годографов для обращения в узле M1/O1, построенная в модуле TX-Curve Selector (часть исходных годографов исключена).

### Итерация 1

На первом шаге, исходя из грубой прикидки для начальной точки годографа с минимальным удалением, находим, что граница лежит заведомо ниже глубины 10. Основываясь на этом, принимаем  $J = 40$ . Запускаем Refractor Builder; выбираем опцию задания скорости 3 и полагаем  $hT = J = 40$ ,  $hB = 120$ . Результат обращения показан на рис. 2а.

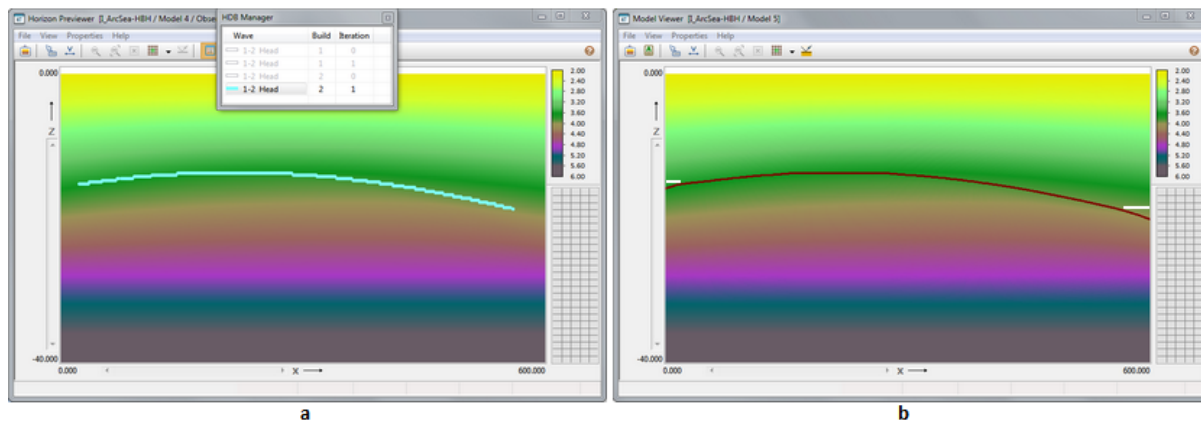


Рис. 2. Итерация 1. а – результат обращения, показанный модулем Horizon Previewer.

б – результат импорта кривой в узел M2 после необходимого редактирования. Горизонт соответствует  $h$ -линии 69.

Экспортируем полученную кривую в MG-файл, создаем копию узла M2 и запускаем на нем Редактор модели MED. Импортируем в него кривую из MG-файла (рис. 2б). По понятной причине, обращение годографов головной волны не может восстановить границу вплоть до боковых границ модели. При импорте такая кривая продолжается от крайних точек до границ модели как горизонталь. Эти продолжения показаны на рисунке белыми отрезками. Такая ситуация нас не устраивает: в следующей итерации продолженная скорость была бы занижена на флангах. Потребовалось редактирование: концы исправлены, кривая продолжена не по горизонтали, а по касательной к крайним точкам. Кроме того, проведено сглаживание скользящими средними и восстановлена скорость, искаженная при импорте. Итерация 1 соответствует  $h$ -линии 69.

### Итерация 2

Копируем узел M1/O1 в M2/O1. Проведем вторую итерацию в точности так же как первую с единственной заменой в задании Refractor Builder:  $hT = J = 67$ . Результаты показаны на рис. 3.

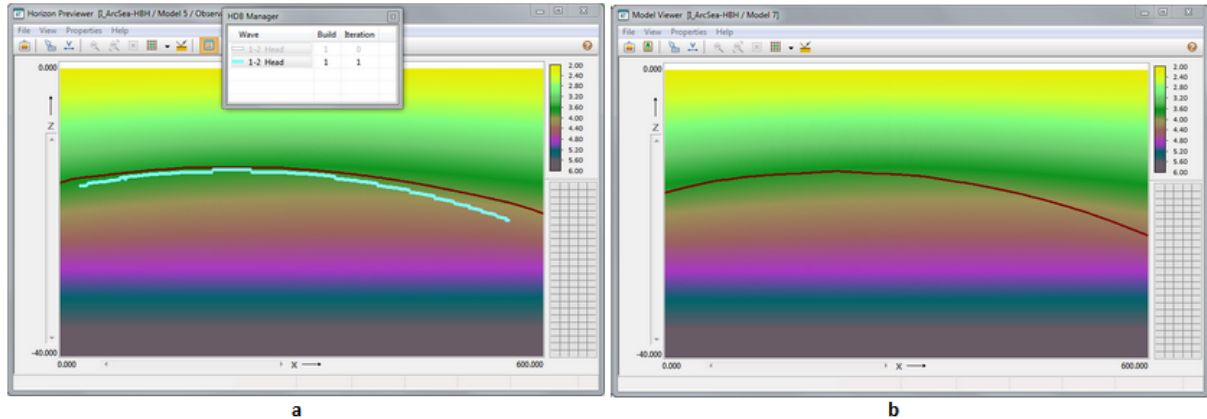


Рис. 3. Итерация 2. а – результат обращения, показанный модулем Horizon Previewer вместе с итерацией 1. б – результат импорта кривой в узел M3 после необходимого редактирования. Горизонт соответствует  $h$ -линии 78.

Итерация 2 совпадает с  $h$ -линией 78. Итерация 3 с  $J = 76$  совпадает с итерацией 2 с точностью до минимального расстояния между  $h$ -линиями решетки. Она здесь не показана. Таким образом, итерация 2 может быть принята за окончательный результат (не считая концов рефрактора, которые не освещаются годографами и восстановлены из соображений гладкости).

Обращение годографов головной волны дает не только форму и положение преломляющей границы, но и граничную скорость  $V_b$ , которую можно приписать подстилающему тонкому слою. Граничная скорость, вычисленная модулем Refractor Builder, хранится в базе данных горизонтов и выводится командой меню Менеджера базы, окно которого видно на рис. 2а. График граничной скорости после некоторого сглаживания показан на рис. 4.

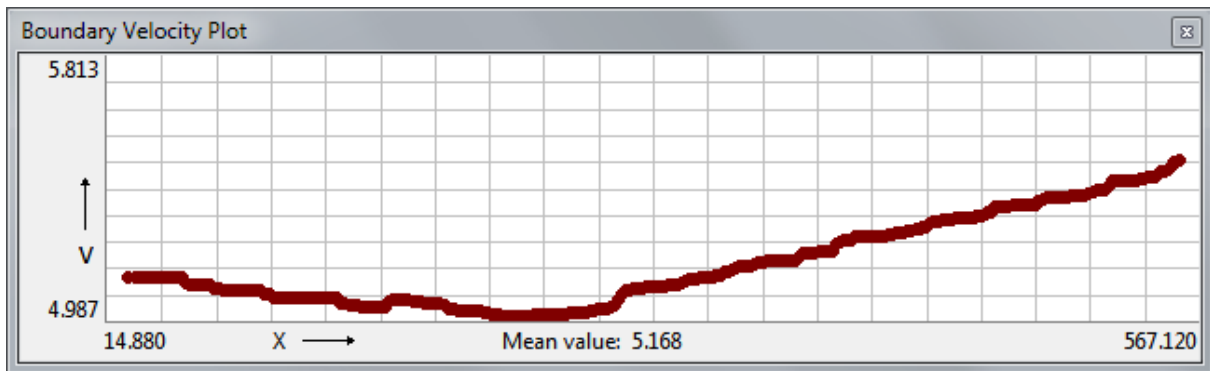


Рис. 4. Итерация 2: граничная скорость.

Сглаживание проведено посредством команды всплывающего меню планшета. Пользуясь другой командой, выведем  $V_b$  в текстовый файл и в Редакторе модели введем ее "вручную" в небольшую выборку ячеек ряда 78. Между ячейками выборки скорость интерполируется. После этого интерполируем скорость между рядом 78 и последним рядом модели. Все проделанные действия описаны [здесь](#). Результат пока-

зан на рис 5а. Рис. 5b показывает решение прямой задачи, с помощью которой получена система годографов.

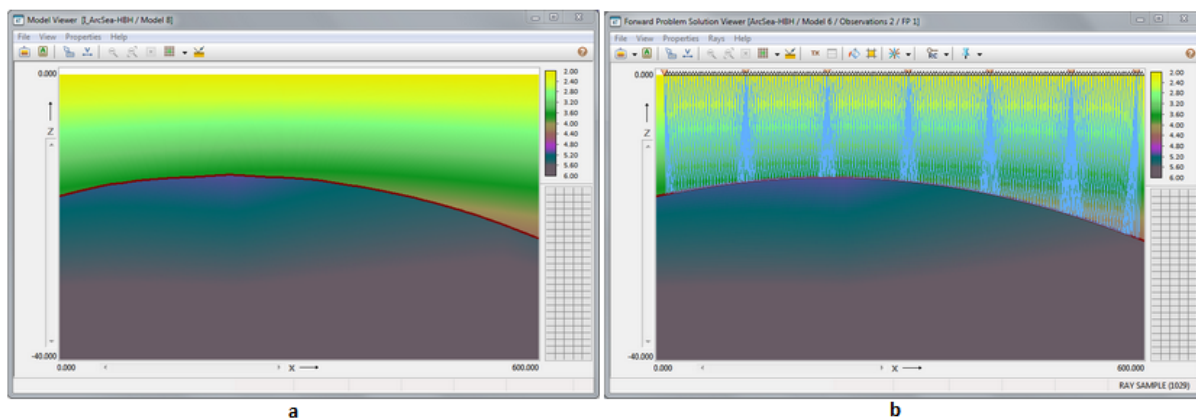


Рис. 5. Результат обращения и верификация.. а – : рефрактор и граничная скорость.

б – Исходная модель и решение прямой задачи для получения системы годографов. Показана небольшая выборка лучей.

Ошибка восстановления горизонта составляет 0.7%, граничной скорости – 0.6%.

## 8 Заключительные замечания

Примеры 1-3 демонстрируют применения алгоритмов обращения годографов отраженной и головной волны. Как видим, определение границы раздела слоистой модели с известными *постоянными* пластовыми скоростями происходит быстро (один шаг) и достаточно точно. В случае *переменной* скорости восстановление подошвы слоя является итерационной процедурой с небольшим числом приближений. Итерационный процесс, описанный при восстановлении рефрактора, конечно, применим и для отражающей границы, он носит общий характер. Использование средней скорости в случае отраженной волны хорошо работает только при короткобазисных наблюдениях.

Усложнение процедуры в случае переменной скорости вызвано требованием алгоритмов обращения, чтобы искомый горизонт обязательно лежал в полосе решетки с постоянной скоростью. Итерации позволяют сузить эту полосу практически до нуля благодаря возможности работы с криволинейными решетками.

Что касается самих алгоритмов, то упомянутое ограничение в кинематической задаче и в рамках лучевого приближения вряд ли устранимо. Поясним это метафорой: можно рассмотреть рельеф дна, даже если смотреть через мутную воду, если только у самого дна вода прозрачна. Но если "густая муть" поднимается со дна, сделать это невозможно.

Разумеется, рассмотренные примеры имеют теоретический, идеализированный характер. Но они дают некоторое основания для разработки методики в практических приложениях.

# Вспомогательные инструменты

## 1 SRT-утилиты

Четыре утилиты помогают подготовить SRT-данные к вводу в систему и приспособить их к решению специальных задач. Утилиты не связаны с текущим процессом обработки, их входные и выходные данные не хранятся в рабочей папке XTomo-LM. Все утилиты запускаются из меню *Tools* Менеджера проектов.

### Утилита SRT Data Adapter

Утилита решает две задачи:

- конвертация SRT-данных из старых форматов SRW, #DT, #FT в формат SRT;
- адаптация входных SRT-данных к физическому разрешению указанного проекта XTomo-LM 3.

Адаптация включает проверку и, при необходимости, модификацию входных данных. Если обнаружен источник или приемник, выходящий за пределы модели, файл считается ошибочным. Если обнаружена ошибка разрешения, утилита перемещает источники/приемники в пределах разрешения, чтобы избавиться от ошибки. При этом возможно исключение некоторых источников/приемников из SRT-данных. В любом случае производится новая нумерация источников и приемников. Результатом является новый файл SRT.

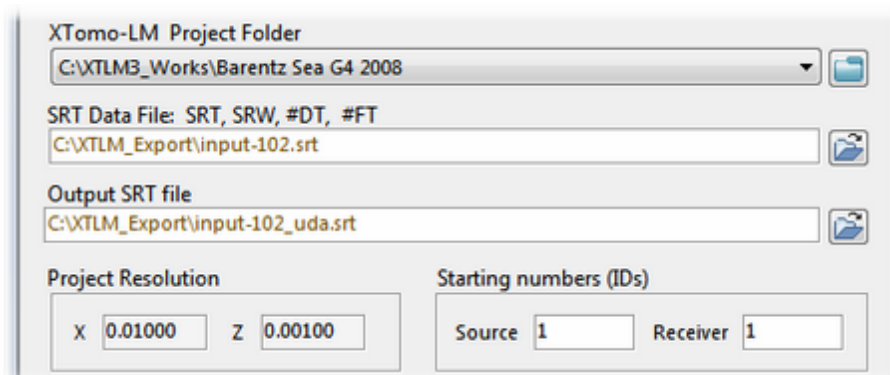


Рис. 1. Фрагмент главного окна утилиты SRT Data Adapter.

Фрагмент главного окна утилиты показан на рис. 1. Пользователь должен указать папку проекта, выбрать входной и выходной файлы. При выборе входного файла следует в файловом диалоге установить нужный фильтр. Разрешение, установленное в проекте, выводится для информации. Пользователь может управлять начальными номерами источников и приемников. Операция начинается щелчком по кнопке *Start*.

### Утилита SRT Data Checker

Утилита осуществляет полную проверку файла SRT и, в случае успеха, по требованию сохраняет его содержимое во временную базу данных. Это хранилище используется утилитами SRT Data Viewer и SRT Model Builder. Проверка файла и протоколирование осуществляется в точности так же, как при [импорте SRT-данных](#). Единственное отличие в том, что в утилите разрешение (и форматы) вводятся пользователем в главное окно (рис. 2). Кнопка *Verify* начинает проверку. Кнопка *Save to DB* выполняет сохранение содержимого файла в хранилище, похожее на упрощенный каталог лучей. Оно называется *SRT database*.

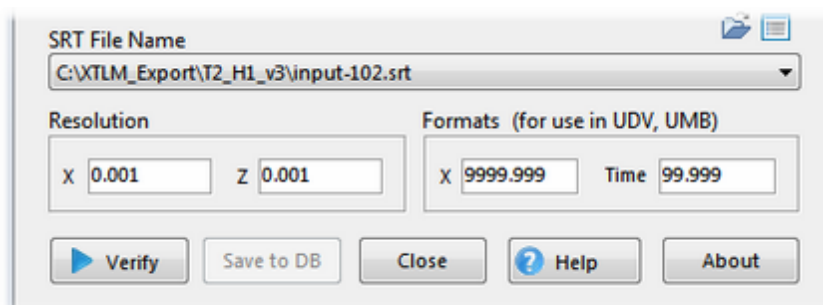


Рис. 2. Фрагмент главного окна утилиты SRT Data Checker.

### Утилита SRT Data Explorer (UDE)

Утилита позволяет просмотреть содержимое файла SRT как набор систем годографов. Предварительно файл должен быть обработан утилитой SRT Data Checker и сохранен в SRT database. Как программа просмотра UDE почти не отличается от модуля [TX-Curve Viewer](#). Единственная разница в том, что UDE поддерживает свой собственный список волн (ID волн извлекаются из SRT database), в то время как TC-Curve viewer использует список волн проекта. В утилите зарезервированы 10 наборов атрибутов рисовки для 10 волн, для остальных используется набор по умолчанию. Атрибуты рисовки можно редактировать командой *View/Waves* главного меню.

Помимо просмотра годографов, UDE может исключать подмножества SRT данных и сохранить результат в новом SRT-файле. Это может оказаться полезным для настройки SRT-данных под разные обратные задачи. Пользователь может удалить наблюдения набора волн или источников или отрезки индивидуальных годографов. В контекстных меню Списка источников и Списка волн имеются команды *Delete*. Обе команды удаляют все выделенные в списках объекты. Для работы с индивидуальным годографом выделите его. Затем с помощью резинового контура задайте отрезок годографа и в рк-меню выберите команду *Delete Segment*. Когда все удаления выполнены экспортируйте данные в SRT-файл командой *File/Create New SRT file*. База SRT database остается при этом неизменной.

### Утилита Primary Model Builder

Утилита предназначена для оценки скорости в среде по годографам непрерывно-рефрагированной (diving) волны. Входные данные берутся из SRT database. Это значит, что они были импортированы из файла SRT утилитой SRT Data Checker и, возможно, обработаны утилитой UDE (см. выше). Предполагается, что на  $x$ -интервале, где определен каждый годограф, среда является горизонтально слоистой (скорость зависит только от глубины). Годограф обращается с помощью модификации метода Герглота-Вихерта-Чибисова. Результатом является скоростная колонка  $V = V(z)$ . Предположение о среде эквивалентно условию, что годограф как функция удаления является строго вогнутой функцией, по крайней мере, на некотором интервале  $[0, B]$ . Если условие выполняется хотя бы для небольшой выборки годографов, можно построить набор скоростных колонок и использовать его как [начальную модель](#) при создании проекта. Обращение годографа происходит до первого нарушения условия. Поэтому обычно получают отрезки колонок, относящиеся к верхней части разреза. Найденные колонки выводятся в файл типа [VC](#).

**Список годографов.** При запуске утилита запрашивает две константы, которые необходимо ввести в диалог запроса: скорость в среде на глубине источника (одна для всех источников) и максимальное значение скорости в среде (оа значения позже можно изменить) После этого выводится список годографов, найденный в базе SRT database (рис. 3). В первой колонке стоит ID годографа. Он составлен из ID источника и буквы n (прямой годограф, normal) или r (встречный, reversed). Далее следуют колонки с числом точек годографа (N), абсциссами первой и последней точки, положением скоростной колонки ( $X_{vc}$ ), значением скорости на глубине источника ( $V_0$ ) и параметром дифференцирования R (см. ниже).

Curve ID	N	Xmin	Xmax	*Xvc	Vo	R
2r	10	0.000	9.000	4.500	2.00	2
3r	20	0.000	19.000	9.500	2.00	2
4r	30	0.000	29.000	14.500	2.00	2
5r	40	0.000	39.000	19.500	2.00	2
6r	50	0.000	49.000	24.500	2.00	2

Рис. 3. Утилита Primary Model Builder. Список годографов.

**Задача пользователя** – выбрать набор годографов для обращения. Желательно, чтобы они имели достаточно большое число точек (освещали разрез на всю глубину) и чтобы их базы в совокупности перекрывали x-диапазон модели. Выбор производится маркировкой годографа двойным щелчком. Икона маркированной кривой меняет цвет. Повторный двойной щелчок отменяет маркировку. Другие команды выбора находятся в контекстном меню списка. Список допускает множественное выделение, так что можно отобрать группу годографов одной командой меню. Там же имеется команда Auto-choice. Она предоставляет выбор утилите, которая, однако, использует весьма примитивный критерий.

**Настройки.** Скоростная колонка, по умолчанию, относится к середине базы годографа. Положение можно изменить в настройках (кнопка *Options*). В диалоге настроек колонку можно отнести к любому X между начальной и конечной абсциссами. Там же можно изменить еще два параметра. Во-первых, это скорость на глубине источника (*First VC Value*). В поле редактирования стоит изначально значение, введенное после запуска утилита. Во-вторых, это параметр дифференцирования годографа. Производная в точке годографа, как обычно для зашумленных данных, вычисляется по наклону прямой, аппроксимирующей отрезок годографа из  $2R + 1$  соседних точек. Число R и является параметром дифференцирования. Чем больше R, тем больше осреднение, тем более гладко меняется производная. При щелчке по кнопке ОК изменения, сделанные в диалоге настроек, будут применены ко всем годографам, которые были выделены в списке в момент вызова диалога.

**Результат.** Кнопка *Build* запускает процедуру обращения для всех годографов с красными значками. Информация об обращении каждого годографа записывается в протокол. Его можно просмотреть кнопкой *Log*. Построенные скоростные колонки в виде графиков  $V(z)$  можно просмотреть в диалоге *Velocity Column Viewer* (кнопка *View VC*). Он показан на рис. 4.

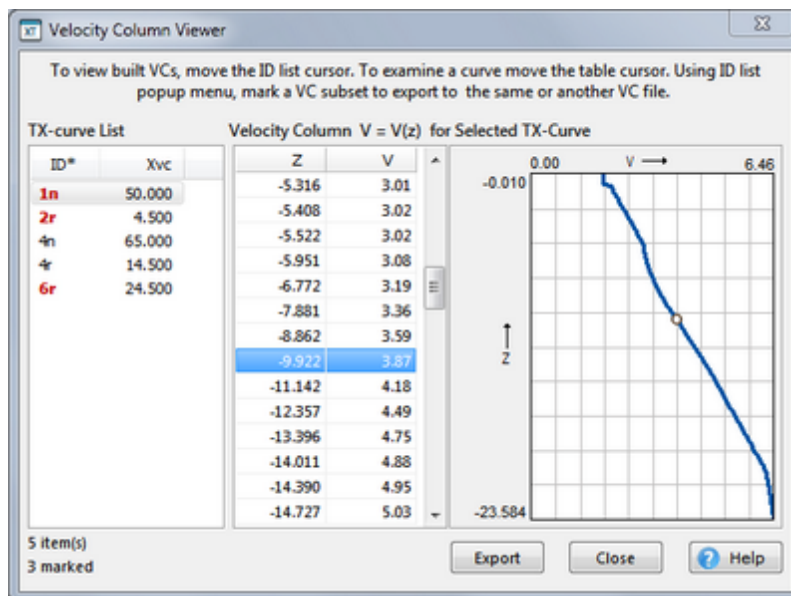


Рис. 4. Утилита Primary Model Builder. Диалог просмотра скоростных колонок.

В списке *TX-Curve List* (Список годографов) перечислены ID обращенных годографов и положения колонок. Второй список подчиняется первому. Он выводит колонку  $V(Z)$ , полученную обращением годографа, выделенного в первом списке. В правой части диалога на планшете выводится график  $V(Z)$ . Точка на графике, соответствующая выделенной строке в таблице  $V(Z)$ , показана кружочком. Просматривая колонки, пользователь может провести отбраковку, пометив "хорошие" колонки. Для этого служит контекстное меню списка годографов. Его команды позволяют маркировать нужные элементы списка. Маркировка обозначается цветом. Кнопка *Export* выводит маркированные колонки в выбранный пользователем VC-файл.

## 2 Статические поправки

### Задача

Применение томографии для расчета статических поправок в записи МОВ-ОГТ хорошо известно. В этой задаче томография на первых вступлениях используется для изучения распределения скорости в верхней части разреза по первым вступлениям. Утилита Static Calculator (USC) рассчитывает статические поправки для заданного набора станций, используя скоростной разрез, полученный в XТомо-LM.

Станции задаются своими номерами и координатами в системе координат того проекта, модель из которого используется для верхней части разреза. Информация о станциях поступает в виде ASCII файла формата SLS (Station Locations for Statics). Новые линии приведения считаются горизонтальными и задаются уравнениями  $Z = h$  для набора постоянных  $h = h_1, h_2, \dots, h_n$ , который пользователь задает в главном окне утилиты. Для каждого значения  $h_i$  утилита создает файл поправок формата SC, который имеет расширение ".sc" или ".txt", по выбору. Имя файла имеет шаблон <префикс><h>.<ext>, например, statics(-1500).txt. Чтобы уровни линий приведения можно было задавать как целые, файл станций SLS содержит необходимый масштабный коэффициент.

### Пользовательский интерфейс

Утилита запускается командой главного меню Project Manager *Tools/Static Corrector*. При этом корневой узел, в котором хранится нужная модель, должен быть выделен в Дереве обработки. Фрагмент главного окна показан на рис. 1.



The screenshot shows a software configuration window with three main sections:

- Input:** Contains two text input fields. The first is labeled "Model Folder" and contains the path "C:\XTLM3\_Works\Barentz Sea G4 2008\Model 2". The second is labeled "SLS File (Stations)" and contains "C:\XTLM3\_Impex\SLS\2134-67.sls". To the right of the SLS File field is a folder icon button. Below these fields, it says "Scale factor for datum Z: -1000."
- Datum:** Contains a text label "Z = H; H sampled from [H1, H2] with step D; all numbers are integers". Below this are three input fields: "H1" with the value "-250", "H2" with the value "-50", and "D" with the value "10". To the right of the D field is the text "H1 < H2; D > 0".
- Output:** Contains three dropdown menus: "SC file name prefix" with the value "statics", "Extension" with the value "TXT", and "Text" with the value "Windows". Below these is an "Output folder" text input field containing "C:\XTLM3\_Impex\SC" and a folder icon button to its right.

Рис. 1. Определение входных данных для USC.

Окно содержит три панели: Input (входные данные), Datum (линия приведения) и Output (выходные данные). На панели Input представлены поля Model Folder (заполняется автоматически) и SLS File. Имя файла следует выбрать, пользуясь кнопкой справа. На панели Datum задается последовательность горизонтальных линий приведения  $Z = H$ . Пользователь вводит граничные значения H1 и H2 и шаг D.

На панели Output задается имя файла согласно шаблону: заполняется поле префикса и выбирается расширение. Если файл готовится для вывода на платформу Unix, укажите это, выбрав нужную строку в списке Text. Для выбора выходной папки, в которую помещаются файлы SC щелкните по кнопке справа от поля Output folder для вызова локального браузера папок. Щелчок по кнопке Старт запускает операцию.

## Приложения

### 1 Экспорт из XTomo LM. Сводка.

Таблица 1. Опции экспорта в ASCII файлы в XTomo-LM

Данные	Формат	Модуль
Скорость $V(x, z)$ в узлах решетки	VFT, DAT	<a href="#">Model Viewer, Model Editor</a>
Сейсмические горизонты модели	MG, BLN	Model Viewer, Model Editor
SRT-данные (все или по волнам)	SRT	<a href="#">Ray Catalog Viewer</a> на o-узле
SR-данные (все или по волнам)	SR	Ray Catalog Viewer на o-узле
Содержимое Каталога лучей после трассировки	SR, SRT, TXT	Ray Catalog Viewer на f-узле
Скорость $V(x, z)$ в вершинах ячеек $c$ , для которых $F(c) > F_0$ , где $F$ – любая функция плотности лучевого покрытия	DAT	<a href="#">Forward Problem Viewer</a>
Лучевые траектории	BLN	Forward Problem Viewer
Функции плотности лучевого покрытия	DAT	Forward Problem Viewer
SRT-данные с зашумленными расчетными временами	SRT	Forward Problem Viewer

Таблица 2. Опции экспорта в графические файлы

Данные	Модуль
Модель	<a href="#">Model Viewer, Model Editor</a>
Модель с системой наблюдений	<a href="#">Graphic Spread Viewer</a>
Модель с трассированными лучами	<a href="#">Forward Problem Viewer</a>
Расчетные годографы (для I-проектов и наблюденные)	Forward Problem Viewer
Функции плотности лучевого покрытия	Forward Problem Viewer
Относительные поправки к скорости после обратной задачи томографии	<a href="#">Inverse Problem Viewer</a>

## 2 Форматы основных ASCII файлов

Типы (форматы) ASCII файлов, используемых в XТото-LM, можно разделить на два класса: *табличные* и *последовательные*. В табличном формате данные представлены в виде таблицы с известным числом колонок. В каждой строке файла должно быть одинаковое количество чисел, равное числу колонок. Числа не должны быть обязательно выровнены по колонкам. Разделителями между числами в строке могут быть пробелы, блоки пробелов, запятые, знаки табуляции. В табличном файле часто присутствует *тительная строка* – первая строка файла, в которой стоят заголовки колонок (обычно в кавычках). Строка не интерпретируется при вводе.

Последовательные форматы определяют файл, состоящий из блоков одинаковой структуры. Блок обычно состоит из заголовочной строки и таблицы. Такой файл перечисляет набор объектов, например, кривых.

Форматы перечислены в алфавитном порядке.

### BLN

Последовательный формат для набора кривых. Является входным для графической системы Surfer®. В XТото-LM используется для экспорта горизонтов модели и лучей. Один блок отвечает одной кривой (горизонту, лучу). Заголовочная строка содержит число точек кривой. Далее следует таблица точек кривой с колонками X, Z.

### DAT

Этот табличный формат используется для представления функции двух переменных  $F(X, Z)$ , как скорость или плотность лучевого покрытия. Формат является входным для графической системы Surfer®. Колонки: X, Z, F. Пример тительной строки: "X", "Z", "V".

### MG

Табличный формат XТото-LM для набора кривых, представляющих h-линии решетки или сейсмические горизонты. Название происходит от "model geometry". Колонки: Номер кривой, X, Z. Для всех точек одной кривой значение в первой колонке одно и то же. Точки кривой следуют по возрастанию X (рис. 1а).

"Horizon #", "X", "Z"			X = 4.500	
1	0.000	-2.700	-0.010	1.93
1	2.041	-2.819	-0.422	1.93
1	4.082	-2.926	-0.427	2.02
1	6.122	-3.022	-0.668	2.06
1	8.163	-3.107		
1	10.204	-3.182	X = 9.500	
			-0.010	1.95
			-0.298	1.95
			-0.327	2.02
			-0.525	2.05
			-0.710	2.09
			-0.906	2.13
			-1.122	2.17
			-1.357	2.22
			-1.613	2.28
			-1.880	2.33
			-2.154	2.39
			X = 14.500	
			-0.010	2.00
			-0.209	2.00

.....

"ID", "X", "Z"			"S_ID", "S_X", "S_Z", "R_ID", "R_X", "R_Z"		
1	0.00000	-0.01000	1	0.000	0.000
2	10.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010
3	20.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010
4	30.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010
5	40.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010
6	50.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010
7	60.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010
8	70.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010

.....

Рис. 1. Форматы ASCII файлов. а – MG (набор кривых); б – VC (набор скоростных колонок).

**S и R**

Формат файлов со списками источников и приемников. Первый имеет расширение ".s", второй – ".r", хотя файлы устроены одинаково. Например, файл источников является таблицей с колонками ID, X, Z (рис. 2а).

**SR**

Табличный формат описания системы наблюдений, т.е. пар источник-приемник. Содержит 6 колонок, три для источника, три для приемника (рис. 2б).

"ID", "X", "Z"			"S_ID", "S_X", "S_Z", "R_ID", "R_X", "R_Z"					
1	0.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	1	0.000	0.000
2	10.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	2	1.000	0.000
3	20.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	3	2.000	0.000
4	30.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	4	3.000	0.000
5	40.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	5	4.000	0.000
6	50.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	6	5.000	0.000
7	60.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	7	6.000	0.000
8	70.00000	-0.01000	1	0.000	-0.010	8	7.000	0.000

Рис. 2. Форматы ASCII файлов. а – S и R (источники или приемники); б – SR (система наблюдений).

**SRT**

Табличный формат для описания наблюдаемых данных в I-проекте. Первые 6 колонок такие же, как формате SR, по три колонки для источника и приемника. Далее следует колонки с наблюдаемым временем пробега волны и кодом волны (рис. 3).

S_ID	S_X	S_Z	R_ID	R_X	R_Z	To	Wave
1	0.000	-0.010	1	0.000	0.000	0.005	0
1	0.000	-0.010	2	1.000	0.000	0.525	0
1	0.000	-0.010	3	2.000	0.000	1.050	0
1	0.000	-0.010	4	3.000	0.000	1.573	0
1	0.000	-0.010	5	4.000	0.000	2.096	0
1	0.000	-0.010	6	5.000	0.000	2.609	0
1	0.000	-0.010	7	6.000	0.000	3.114	0
1	0.000	-0.010	8	7.000	0.000	3.610	0
.....							
1	0.000	-0.010	1	0.000	0.000	7.513	10
1	0.000	-0.010	2	1.000	0.000	7.528	10
1	0.000	-0.010	3	2.000	0.000	7.560	10
1	0.000	-0.010	4	3.000	0.000	7.611	10
1	0.000	-0.010	5	4.000	0.000	7.678	10
1	0.000	-0.010	6	5.000	0.000	7.762	10
1	0.000	-0.010	7	6.000	0.000	7.863	10
1	0.000	-0.010	8	7.000	0.000	7.978	10
1	0.000	-0.010	9	8.000	0.000	8.108	10

Рис. 3. Форматы ASCII файлов. Формат SRT предназначен для описания наблюдений в I-проектах.

#### VC

Формат XТото-LM для импорта/экспорта скоростных колонок. Последовательный формат с блоками, отвечающими скоростным колонкам. Заголовочная строка блока содержит абсциссу скоростной колонки в виде X = <число> (рис. 1b).

#### VFT

Формат для скорости модели, используемый системой Firstomo и всеми версиями XТото-LM. Табличный файл без титульной строки с колонками: номер ячейки в Firstomo, X, Z, V. Используется для обмена между разными версиями систем Firstomo, XТото-LM.

## 3 Другие форматы

#### Форматы файлов для статических поправок

Использование XТото-M для ввода статических поправок требует входного файла станций (формат SLS) и выходного файла поправок (формат SC). Необходимы сведения о реализации можно найти [здесь](#). Форматы обоих типов файлов приведены на рис. 1

ZScale = -1000			Reference datum elevation: -250
"Station ID",	"X",	"Z"	"Station ID", "Correction (ms)"
333	99.8764	0.0	999999999 9999999
334	99.0783	0.0	333 -114
335	98.2804	0.0	334 -114
336	97.4825	0.0	335 -114
337	96.6845	0.0	336 -114
338	95.8858	0.0	337 -114
339	95.0879	0.0	338 -114
340	94.2899	0.0	339 -115
341	93.4920	0.0	340 -115
342	92.6941	0.0	341 -115
343	91.8954	0.0	342 -115
344	91.0974	0.0	343 -115
345	90.2995	0.0	344 -115
346	89.5016	0.0	345 -115
347	88.7035	0.0	346 -115
348	87.9049	0.0	347 -116
349	87.1070	0.0	348 -116
350	86.3091	0.0	349 -116
.....			.....
a)			b)

Рис. 1. Форматы файлов для ввода статики. а - SLS (станции); б - SC (поправки).

Формат SLS имеет в первой строке масштабный коэффициент для задания глубин в целых числах, как в стандарте SEG-Y. Масштабный коэффициент  $S$  является одним из чисел  $-10000, -1000, -100, -10, 1, 10, 100, 1000, 10000$ . Масштабированное целое  $N$  и его истинное значение  $R$  связаны так:  $R = N \cdot S$ , если  $S > 0$ , и  $R = -N/S$ , если  $S < 0$ .

Вторая строка файла - титульная (задает имена колонок). Она не интерпретируется, но должна присутствовать в файле. Далее следует таблица "ID станции-X-Z". Разделителями колонок в строке файла могут быть пробелы, запятые или знаки табуляции. Выравнивания не требуется.

Формат файла SC приспособлен к вводу в одну из стандартных сейсмических систем обработки. В первой строке указывается z-координата линии приведения, на которую пересчитываются станции. Истинная глубина в используемых единицах рассчитывается с помощью масштабного коэффициента из файла SLS. Далее следует титульная строка (ID станции и поправка в миллисекундах, которую надо добавить к времени станции). Последовательности из девяток указывают на максимальную длину числа в таблице. Далее следует, собственно, таблица.

# Указатель

## - C -

color set 28  
column 11  
comment 15  
concurrency 64  
conversion coefficient (CC) 8  
converted wave 8  
CS 28

## - D -

docked 65, 67

## - F -

fixed cell 74  
forward problem 62  
FPS 62  
FPV 62, 65  
f-узел 20

## - G -

GPA 12, 39  
grid 11  
Grid Perturbation Area 12, 39

## - H -

head wave 8  
h-line 11  
horizon 12  
horizon ID 12  
Horizon Previewer 90  
horizontal strip 11  
hot keys 35

## - I -

ID волны 8  
ID горизонта 12  
initial points 94  
inversion project 7  
IPS 80  
I-проект 7

i-узел 20

## - L -

luminance 26

## - M -

MED 39  
mesh 11  
Model Editor 39  
modeling project 7  
m-узел 20

## - N -

node 11

## - O -

o-узел 20

## - P -

package 29  
primary model 17, 105  
Primary Model Builder 105  
Processing Tree 15  
project folder 15  
project properties 18

## - R -

ray catalog 49  
ray coverage 72  
ray-tracing precision 64  
RC 72  
RCH 72  
RCV 72  
reciprocal points 85  
reciprocal points base 85  
reciprocal time 85  
reflection 8  
Reflector Builder 90  
refraction 8  
Refractor Builder 94  
regularized linear least square problem 77  
remeshing 12  
resolution 12

resolution error 12  
row 11

**- S -**

SC (формат файла) 107  
seismic horizon 12  
simple model 17  
SLS (формат файла) 107  
spread 49  
SRT data 9  
SRT Data Adapter 104  
SRT Data Checker 105  
SRT Data Viewer 105  
SRT-данные 9  
SR-данные 9  
stabilizer 77  
Surfer 7

**- T -**

time errors 65  
top line 39  
TX-curve 52  
TX-Curve Explorer 87

**- V -**

velocity profile 36  
vertical strip 11

**- W -**

wave code 8  
wave ID 8  
wave list 24  
working folder 16

**- A -**

аппроксимация 42  
архив 29  
архивная папка 16

**- Б -**

база данных горизонтов 85  
менеджер 90  
база сопряжения 94

быстрые клавиши 35

**- В -**

верхняя граница модели  
редактирование 39  
взаимное время  
невязка 87  
волна  
converted 8  
diving 8  
diving wave 8  
head 8  
ID 8  
refraction 8  
transient 8  
атрибуты рисовки 25  
головная 8  
добавление 24  
кодировка 8  
непрерывно-рефрагированная 8  
ныряющая 8  
обменная 8, 24, 63  
отраженная 8  
первая 8  
преломленная 8  
проходящая 8  
редактирование атрибутов 25  
список 24  
экспорт/импорт 24  
встречные годографы 85  
выборка лучей 69  
создание 70  
сохранение в I-проекте 71

**- Г -**

геометрия решетки и скорость 46  
годограф 52, 67  
выборка для обращения 87  
начальные точки 94  
обращение 85, 94, 100  
подготовка к обращению 87  
система 85  
графический модуль  
планшет 31  
профиль скорости 31, 36  
свойства решетки 33



графический модуль  
спектр 31  
список горизонтов 33  
статусная панель 31  
экспорт в ASCII файлы 36  
экспорт в графические файлы 36

**- Д -**

Дерево обработки 15  
f-узел 20  
i-узел 20  
m-узел 20  
o-узел 20  
контекстное меню 21  
копирование узлов 21  
примечания 20  
рост 21  
создание узлов 21  
удаление узлов 21  
узел 20

**- З -**

замораживание скорости 74

**- И -**

интерполяция 42

**- К -**

каталог лучей 49  
просмотр 50  
редактирование в М-проекте 59  
экспорт 52  
кинематическая интерпретация 5  
кодировка волн 8  
конвертация данных версии 2 29  
концепция представления модели 10  
коэффициент конверсии 8

**- Л -**

лучевая картина 65, 66

**- М -**

Менеджер волн 24

Менеджер проектов 15, 19  
метод наименьших квадратов 77  
моделирование 5  
модуль 7  
активный 23  
управление из Менеджера проектов 23  
М-планшет 65  
М-проект 7

**- Н -**

начальная модель 105  
создание 17  
начальное приближение 5  
начальные точки годографов 94  
невязки времен 65  
распределения 72  
статистики 71

**- О -**

область возмущения 39  
обратная задача томографии 5, 77  
просмотр решения 82  
решение 80, 82  
обратная кинематическая задача 5  
обращение годографов  
головная волна 85  
отраженная волна 85  
ограничения 77  
ошибка разрешения 12

**- П -**

пакет 29  
папка  
архивная 16  
импорта.экспорта 16  
проекта 14  
рабочая 14  
папка проекта 15  
папка экспорта/импорта 16  
первые вступления 8  
планшет  
selection 35  
быстрые клавиши 35  
выделение 34, 35  
кадр 31  
лупа 34

планшет  
   М- 65  
   меню 31, 35  
   резиновый контур 34  
   рк-меню 34  
   селектор 34  
   Т- 65  
   увеличение 34  
 плотность лучевого покрытия 72  
 построение отражателя 90  
 построение рефлектора 94, 98  
   скорость в покрывающей среде 90  
 построение рефрактора 100  
 построение сейсмических границ 85  
 проект  
   архив 29  
   архивация 19  
   добавление в рабочую папку 19  
   из данных версии 2 19  
   клонирование 19  
   конвертация данных версии 2 29  
   копирование 19  
   пакет 29  
   папка 15  
   переименование 19  
   свойства 18, 19  
   создание 19  
   создание из пакета/архива 19  
   удаление 19  
 прямая задача 5, 62  
   протокол 64  
   решение 62  
 прямая кинематическая задача 5

**- Р -**

рабочая папка 16  
 разрешение 18  
   вычислительное 12  
   ошибка 12  
   физическое 12  
 регуляризация 77  
 регуляризатор 77  
 редактор кривых 42  
 резиновый контур 34  
 решетка  
   GPA 12  
   grid perturbation area 12

horizon 12  
 seismic horizon 12  
 вставка рядов и колонок 41  
 геометрия 45  
 горизонт 12  
 изменение геометрии 45  
 изменение густоты 40  
 импорт h-линий 45  
 область возмущения 12, 39  
 перемещение h-линий 45  
 перестройка 12  
 редактирование скорости 46  
 сейсмический горизонт 12  
 решетка (сетка)  
   h-линия 11  
   v-линия 11  
   вертикаль 11  
   вершина 11  
   колонок 11  
   полоса 11  
   ряд 11  
   узел 11  
   ячейка 11  
 рк-меню 34  
 ручной подбор модели 5

**- С -**

свойства решетки 33  
 сглаживание 42, 46, 77  
 сейсмический горизонт 12  
 сетка 11  
 система годографов 85  
 система годографов волны 52  
 система координат 11  
 система наблюдений 49  
   импорт 54  
   просмотр 50  
   редактирование в М-проекте 56  
   создание в М-проекте 56  
 скоростная колонка 106  
 скорость  
   refined 77  
   замораживание 74  
   продолжение 46  
   редактирование 46  
   сглаживание 46  
   уточненная 77

скорость  
    уточненная - копирование 83  
    фиксация 74  
скорость в покрывающей среде 90  
сопряженные точки 85  
спектр цветов скорости 19  
    color sets 28  
    линейчатый 26  
    непрерывный 26  
    редактирование 26  
    редактирование линий 27  
    создание 27  
    цветовые наборы 28  
    яркость 26  
список активных модулей 23  
список горизонтов 12, 33  
стабилизатор 77  
статические поправки 107  
статические поправкм 112

### - Т -

Т-планшет 65, 67  
трассировка лучей  
    точность 64

### - У -

утилита 7  
    Primary Model Builder 104  
    SRT Data Adapter 104  
    SRT Data Checker 104  
    SRT Data Explorer 104  
    Static Calculator 107

### - Ф -

файл  
    ASCII 9, 110, 112  
    BLN 110  
    CS 28  
    DAT 110  
    MG 110  
    S и R 9, 110, 111  
    SC 112  
    SLS 112  
    SR 9, 111  
    SRT 9, 110, 111  
    VC 110, 112

VFT 110, 112  
фиксация скорости 74  
формат 13, 18  
ф-ячейка 74

### - Ц -

цикл обработки 14  
    завершение 83

### - Ч -

черные ячейки 29

### - Э -

экспорт в ASCII файлы 36, 52, 75, 109  
экспорт в графические файлы 36, 75, 109