

УДК 550.34.01

К ВОПРОСУ О РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕЖСКВАЖИННОЙ ЛУЧЕВОЙ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

М.А. Шишкина^{1,2}, И.В. Фокин¹, С.А. Тихоцкий¹

*¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли
им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук,*

123995, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, e-mail: sat@ifz.ru

*²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Геологический
факультет,*

Москва, Ленинские горы, 1, МГУ, Геологический факультет,

e-mail: maryrose17@yandex.ru

В работе рассмотрена проблема оценки разрешающей способности в задачах лучевой сейсмической томографии (на примере межскважинной томографии). Используется подход, основанный на имитационном моделировании для различных типов структур и параметров эксперимента. Исследуется зависимость разрешающей способности от геометрии расстановки источников и приёмников, дискретности системы наблюдения, типа скоростной модели среды (локализованные либо периодические аномалии скорости), спектрального состава зондирующего импульса. Делаются выводы относительно оптимизации системы наблюдений и оценки предела разрешающей способности, связанного с конечной длиной волны.

Ключевые слова: лучевая сейсмическая томография, разрешающая способность, зона Френеля, межскважинная томография

ABOUT THE TRAVELTIME SEISMIC TOMOGRAPHY RESOLUTION

Shishkina, M.^{1,2}, Fokin, I.¹, Tikhotskiy, S.¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,

123995, Moscow, Bolshaya Gruinskaya str., 10-1, e-mail: sat@ifz.ru

²Lomonosov Moscow State University,

119234, Moscow, Leninskie Gory, 1, MSU,

e-mail: maryrose17@yandex.ru

The problem of estimation of the resolution in travelttime seismic tomography investigations is considered in case of cross-well tomography. The approach based on the synthetic modeling of different types of velocity structures and experiment's parameters is used. The dependence of the resolution on the geometry of sources and receivers, discontinuity of the observational system, type of the velocity model (localized or periodic velocity anomalies), and spectral composition of the sounding impulse are examined. Conclusions concern the optimization of the observational system and estimation of the resolution limit, connected to the finite wave length.

Key words: travelttime seismic tomography, resolution, Fresnel zone, cross-well tomography

Введение.

Настоящая работа посвящена исследованию некоторых аспектов проблемы разрешающей способности лучевой сейсмической томографии. Эта проблема неоднократно поднималась в многочисленных исследованиях [напр. Yordkayhun, Trygvasson, Juhlin, 2007; Zelt 1998]. Тем не менее, логика развития метода и его активное применение в последнее время для решения задач инженерной и разведочной геофизики [Yordkayhun, 2011; Vesnaver, 2008; Paasche et al., 2009; Bube and Langan, 2008; Фокин и др. 2011], которые часто требуют достижения разрешающей способности, близкой к теоретическому пределу, подразумевают рассмотрение ряда вопросов, которые не описаны в литературе достаточно полно и систематично.

Под разрешающей способностью в лучевой сейсмической томографии обычно понимают, по аналогии с оптикой, способность метода правильно воспроизвести «изображение» близко расположенных «объектов» – аномалий скорости [Яновская, 1997]. В качестве количественной характеристики разрешающей способности можно использовать

минимальное расстояние между аномалиями скорости разного знака, которые могут быть правильно воспроизведены в результате полевых наблюдений и решения обратной задачи методом лучевой сейсмической томографии. Иногда в качестве такой характеристики используют минимальный размер правильно воспроизводимой одиночной аномалии скорости. В действительности, эти две характеристики различны: легко представить ситуацию, когда одиночная аномалия будет воспроизведена достаточно точно, тогда как чередование аномалий того же размера, но разного знака порождает аномалии времен пробега, близкие к нулевым, а следовательно, их воспроизведение практически невозможно. Также следует конкретизировать, что понимается под «правильным воспроизведением» аномалий. С точки зрения практики, во многих случаях достаточно указать на наличие, характерный размер и знак аномалии скорости, т.е. решить задачу обнаружения аномалии. В других случаях важно также и с определённой степенью точности указать на величину (т.е., амплитуду) аномалии – решить задачу количественной интерпретации. Ясно, что по отношению к этим двум случаям, разрешающая способность может быть различна.

Как следует из физико-математических основ метода и подтверждается опытом множества исследователей [Яновская, 1997; Chiao, Kuo, 2001; Zhang, Thurber, 2007; Тихоцкий, Фокин, Шур, 2011] разрешающая способность лучевой сейсмотомографии является функцией координат в объёме исследуемой среды: в каких-то частях модели удаётся адекватно воспроизвести тонкие детали строения, тогда как в других – лишь общие черты. Поэтому разрешающую способность естественно называть «локальной» и рассматривать её как функцию координат. Локальная разрешающая способность зависит от множества факторов: системы наблюдений, качества данных и уровня шума, действительного строения среды (распределения скорости в среде, наличия границ), частотного состава зондирующего импульса, правильности наших априорных представлений о строении среды (адекватности «начальной модели»), используемых алгоритмов и вычислительных схем, в частности – способа параметризации строения среды. Комбинация этих факторов порождает множество конкретных практических ситуаций, что влечёт необходимость исследования разрешающей способности для каждого конкретного эксперимента. На практике такое исследование обычно выполняется с помощью имитационного моделирования, в том числе с использованием так называемых «шахматных тестов» [напр, Zelt, 1998; Koulakov et al., 2009], т.е. на основе имитационного моделирования, при котором в качестве модели строения среды используется чередование аномалий скорости разного знака в шахматном порядке (в том числе и в трёхмерных моделях). Иногда используются иные модели, с чередованием аномалий. Подобный подход стал, в

значительной мере, стандартом «де факто». Следует, однако, помнить, что разрешающая способность в модели среды, близкой к геологической реальности, может существенно отличаться от полученной на основе подобного теста. Кроме того, при использовании этого подхода обычно предполагается, что если в результате теста удаётся разрешить (восстановить адекватно для поставленной задачи) модель с некоторым размером скоростной аномалии, то большие размеры неоднородностей заведомо разрешимы. Между тем, в [Leveque, Rivera, Wittlinger, 1993] показаны контрпримеры: восстановлена «шахматная» структура скоростных аномалий, а объекты большего размера восстановлены некорректно.

Данное исследование не претендует на рассмотрение всех аспектов проблемы разрешающей способности лучевой сейсмической томографии, которые очень многообразны. Из сказанного выше следует, что такое полное исследование вообще не представляется возможным. Тем не менее, некоторые общие закономерности влияния отдельных факторов на разрешающую способность целесообразно рассмотреть, с тем, чтобы сформулировать методические требования к соответствующим параметрам наблюдений и обработки их результатов для решения определённых практических задач. В качестве такой задачи, в данном исследовании, рассматривается задача межскважинного просвечивания, которое активно применяется при решении разведочных и, прежде всего, – инженерно-геофизических задач [Болгаров, Рослов, 2009; Иванссон, 1990; Wang and Rao, 2006]. В данной статье авторы ограничиваются рассмотрением двух основных факторов: частотного состава зондирующего импульса и параметров системы наблюдений.

Метод исследований.

В качестве метода исследований в настоящей работе используется имитационное моделирование эксперимента по межскважинному сейсмическому просвечиванию. Такие исследования часто выполняются при решении инженерно-геофизических задач, включая исследование оснований уже возведённых сооружений, а также – при изучении площадок под строительство. Межскважинное просвечивание также используется и при решении разведочно-поисковых задач. Метод имитационного моделирования состоит в решении прямой задачи для заданной модели среды (далее – синтетическая модель) и геометрии «эксперимента», имитирующего используемые в практики расстановки источников и приёмников. Полученные результаты: времена пробега либо сейсмограммы (далее – синтетические данные) затем используются в качестве входных данных для инверсии (решения обратной задачи). По степени соответствия между результатом решения обратной задачи (далее – результат инверсии) и синтетической моделью судят о

применимости и работоспособности используемых алгоритмов и их параметров и о разрешающей способности. В качестве меры соответствия можно рассматривать количественные критерии, такие как невязка между синтетической моделью и результатом инверсии. В данной работе ограничимся качественным анализом полученных результатов.

Имитационные тесты, рассмотренные в настоящей работе, делятся на две группы: в *первой группе тестов* решение прямой задачи делается в лучевом приближении, с использованием метода конечно-разностного решения уравнения эйконала [Vidale, 1990]. Обратная задача также решается в рамках лучевого приближения с использованием алгоритма, описанного в [Тихоцкий, Фокин, Шур, 2011; Tikhotsky, Achauer, 2008]. Данный алгоритм предусматривает адаптивную параметризацию среды с помощью вейвлет-функций Хаара в соответствии с локальной разрешающей способностью метода лучевой сейсмической томографии. В качестве оценки разрешающей способности используются понятия *лучевого и углового покрытия*. Лучевое покрытие определяется плотностью лучей, проходящих через данный объем среды. Этот параметр является интуитивно понятным и логичным способом оценки локальной разрешающей способности метода. Под угловым покрытием понимается степень разброса направлений лучей, проходящих через данную ячейку модели, и он также является важным фактором адекватного разрешения сред. В настоящей работе параметризация модели является, по сути, *квадратно-клеточной* — при решении обратной задачи используются все ячейки базовой сетки, через которые проходит хотя бы один луч. Лишь в некоторых расчетах (исследование центральной большой цилиндрической модели) налагалось требование, чтобы количество лучей в ячейках модели было не меньше 250. На результатах видны связанные с этим «клеточные» артефакты (рис. 4, 11), однако они не являются критическими для исследований, проводимых в данной работе.

Целью данной группы тестов является исследование зависимости разрешающей способности от геометрии расстановки источников и приёмников и типа синтетической модели. Полученные в первой группе тестов оценки соответствуют теоретическому пределу разрешающей способности, который может быть достигнут, если лучевое приближение справедливо, что на практике означает, что длина волны зондирующего импульса много меньше характерного размера всех имеющихся в среде неоднородностей.

Поэтому результаты первой группы тестов могут рассматриваться в качестве эталона, т.е. наилучшей разрешающей способности, которая может быть достигнута для данной комбинации модели и геометрии эксперимента. Этот эталон используется в качестве образца для сравнения с результатами тестов второй группы.

Во *второй группе тестов* решение прямой задачи состоит в моделировании распространения сейсмических волн в упругой среде с использованием решения уравнений движения методом конечных элементов [Komatitsch and Vilotte, 1998]. Результатом решения прямой задачи в данном случае являются синтетические сейсмограммы. Решение обратной задачи выполняется в лучевом приближении с использованием того же алгоритма. Перед решением обратной задачи выполняется выделение на синтетических сейсмограммах первых вступлений. Таким образом, данная группа тестов более точно имитирует реальность, в которой распространение волн в среде происходит по законам уравнений движения и при конечной частоте (точнее – ограниченном спектре) зондирующего импульса, а инверсия выполняется в лучевом приближении. Варьируя полосу частот зондирующего импульса, можно исследовать зависимость разрешающей способности от частотного состава сигнала (и связанным с ним понятием зоны Френеля), что является основной целью второй группы тестов.

Отметим, что в данных тестах в синтетические данные не вносились случайных погрешностей, которые неизбежно присутствуют в реальном эксперименте. Исследование влияния случайного шума на результаты инверсии выходит за рамки настоящей работы.

Все тесты проводятся в рамках двумерного моделирования.

Имитационные модели.

Для описания параметров модели принята система координат с осью x , направленной вправо, и началом, совпадающим с положением левой скважины, ось z направлена вверх, отметка $z = 0$ м совпадает с дневной поверхностью (устьями скважин).

Используются расстановки трёх типов: II, III и IV (по числу линий расстановки источников и приёмников). Расстановка II типа («двусторонняя») соответствует межскважинному просвечиванию: источники и приёмники размещаются в скважинах на левом и правом краю изучаемой области (рис. 1.а). Такая расстановка, в частности, может применяться при изучении оснований под возведёнными сооружениями. Известно (и демонстрируется далее в настоящей работе), что такая расстановка не оптимальна с точки зрения разрешающей способности в направлении оси x , поскольку значительная часть

лучей направлена субгоризонтально. Расстановка типа III («П-образная», рис. 1.б) соответствует двум скважинам и еще горизонтальной линии наблюдений от устья к устью. Вдоль этой линии может производиться как возбуждение (например, кувалдой), так и расстановка приёмников. В последнем случае следует принимать во внимание, что если в скважинах обычно приём осуществляется приёмниками давления, то на поверхности измеряется вертикальная компонента смещения (либо скорости или ускорения), а потому имеет значение поляризация сигнала. Наконец, для полноты картины рассмотрена расстановка IV типа, («четырёхсторонняя», рис. 1.в), в которой ещё одна горизонтальная линия приёма (возбуждения) организована на глубине и соединяет забои скважин. На практике такая система сложно реализуема, однако её аналоги могут быть использованы при межштрековом просвечивании в шахтах и рудниках. Последний тип расстановки следует рассматривать как соответствующий теоретически возможному пределу плотности лучевого покрытия (включая угловое покрытие – диапазон разброса направлений лучей) и наилучшей достижимой разрешающей способности.

В исследовании использованы синтетические модели двух типов: с локализованной одиночной аномалией (тип 1) и с периодическим чередованием аномалий скорости разного знака в шахматном порядке (тип 2).

При использовании моделей типа 1 имитируется просвечивание в межскважинном пространстве с расстоянием 88 метров между скважинами и глубиной скважин 120 метров. Места установки источников и приёмников и их число (плотность) варьируются. Очевидно, результаты могут быть перенесены на модели иных геометрических размеров с использованием пространственно-временного подобия: можно принять расстояние между скважинами за единицу длины и соответствующим образом масштабировать скорости и длины волн. В данной работе, однако, используется естественная система единиц для удобства изложения.

Модель 1.1 («большой цилиндр», рис. 2.а) представляет собой межскважинное пространство с постоянной скоростью $v = 2500$ м/с в центре которого ($x = 45$ м, $z = -60$ м) находится аномалия в виде кругового цилиндра, бесконечно вытянутого вдоль оси y , в центральной части которого скорость достигает 2800 м/с. Диаметр цилиндра составляет 30 м (0,34 расстояния между скважинами), скорость увеличивается линейно на протяжении переходной зоны шириной 6,5 м, при этом внешний диаметр полученной аномалии включая переходную зону составляет 36,5 м (0,4 расстояния между скважинами).

Модель 1.2 («малый цилиндр», рис. 2.б,в) аналогична по форме аномалии и значениям скоростей, но диаметр цилиндра составляет 4 метра (0,045 расстояния между скважинами), ширина переходной зоны – 1 метр, соответственно, внешний диаметр аномалии составляет 5 м (0.056 расстояния между скважинами). В модели 1.2.а (рис. 2.б) аномалия расположена в центре модели, как и в модели 1.1. В модели 1.2.б (рис. 2.в) аналогичный цилиндр сдвинут в левый нижний угол, его центр находится в точке с координатами $x = 7$ м, $z = -96$ м.

В моделях типа 2 (чередование аномалий скорости в шахматном порядке) имитируется просвечивание в межскважинном пространстве с расстоянием 30 метров между скважинами и глубиной скважин также 30 метров. Места установки источников и приёмников варьируются.

Модели 2.1.а,б («малые прямые шахматы», рис. 3.а,г) представляют собой чередование аномалий скорости, в шахматном порядке с размером «клетки» 4х4 метра (0,13 расстояния между скважинами). Ширина переходной зоны между двумя клетками, в пределах которой величина скорости меняется от минимума до максимума линейно, составляет 2 метра. В модели 2.1.а (рис. 3.а) размах скорости составляет от 2100 до 3900 м/с (амплитуда аномалий составляет 30 % от средней скорости в среде, равной 3000 м/с). В модели 2.1.б (рис.3.г) размах скорости составляет от 2700 до 3300 м/с (амплитуда аномалий составляет 10 % от средней скорости в среде).

Модели 2.2.а,б («малые наклонные шахматы», рис. 3.б,д) представляют собой модели 2.1, повернутые на угол 30 градусов по часовой стрелке. Таким образом, в отличие от моделей 2.1 в моделях 2.2 направление «горизонталей и вертикалей шахматной доски» не параллельно линиям наблюдений. В модели 2.2.а (рис. 3.б) размах скорости составляет от 2300 до 3900 м/с. В модели 2.2.б (рис. 3.д) размах скорости составляет от 2700 до 3300 м/с.

Модели 2.3.а,б («большие наклонные шахматы», рис. 3.в,е) аналогичны моделям 2.2, но размер «клетки шахматной доски» составляет 8 метров (0,26 расстояния между скважинами), ширина переходной зоны – 4 метра. В модели 2.3.а (рис. 3.в) размах скорости составляет от 2300 до 3900 м/с. В модели 2.3.б (рис. 3.е) размах скорости составляет от 2700 до 3300 м/с.

Результаты. Первая группа тестов.

Как указано выше, целью первой группы тестов является изучение зависимости разрешающей способности от геометрии эксперимента для различных моделей сред, в

предположении, что лучевое приближение выполняется, т.е. длина волны много меньше размера неоднородностей среды.

Модели первого типа (одиночные аномалии скорости).

На рис. 4.а,б,в показаны результаты решения обратной задачи для синтетической модели 1.1 («большой цилиндр»), соответственно для расстановок типов II, III и IV. Во всех случаях шаг между источниками в одной линии составлял 10 метров, между приёмниками – 2 метра. Для каждого положения источника регистрация осуществлялась всеми приёмниками, расположенными в противоположной скважине. При проведении трассировки встречные лучи (лучевые траектории), дублирующие друг друга, рассматривались только один раз. Моделирование распределения скорости в среде осуществлялась при помощи детальной сетки 0,25 x 0,25 м. Решение обратной задачи решалось на сетке с базовым размером ячеек 1,5 x 1,5 м. Для наглядности пунктирными линиями нанесены внешний и внутренний контуры переходной зоны от фоновой скорости к аномалии в центральной части цилиндра. Видно, что во всех случаях положение центра аномалии, её характерный размер и амплитуда в центральной части определяются правильно. Однако при использовании двусторонней расстановки (тип II, рис. 4.а) форма восстановленной аномалии заметно искажена: аномалия вытягивается вдоль оси x, что объясняется доминирующим субгоризонтальным направлением лучей. Также заниженной оказывается амплитуда в центре цилиндра. При использовании П-образной расстановки (тип III, рис. 4.б) аномалия восстанавливается намного точнее, правильно выделяется не только амплитуда в центре, но и положение переходной зоны, однако эффект расплывания в горизонтальном направлении ещё заметен. Наконец с использованием четырёхсторонней расстановки (тип IV, рис. 4.в), синтетическая модель восстанавливается практически точно.

Помимо типа расстановки на результаты инверсии, очевидно, оказывает влияние шаг между пунктами излучения и между пунктами приёма. Исследование этого фактора проводилось на модели «малого цилиндра», т.к. эффект начинает проявляться, когда шаг между пунктами становится соизмерим с размером неоднородностей в среде.

На рис. 5 показаны результаты инверсии для модели 1.2.а («центральный малый цилиндр»). На рис. 5.а-в представлены результаты инверсии для шага, как между источниками, так и между приёмниками 10 м (напомним, диаметр аномалии составляет 4 м). Видно, что положение аномалии восстанавливается правильно для всех типов расстановок, тогда как её амплитуда занижена. На рис. 5.г-е представлены результаты для

шага между источниками 10 м, между приёмниками – 4 м. В данном случае при использовании четырёхсторонней расстановки (рис. 5.е) правильно восстанавливается уже и амплитуда аномалии. На рис. 5.ж-и представлены результаты для шага между приёмниками и источниками 2 м. Результаты практически не отличаются от предыдущего случая. Тенденции к вытягиванию аномалии в горизонтальном направлении при использовании двусторонней расстановки полностью аналогичны таковым, описанным для модели 1.1. Отметим, что в данной модели правильное восстановление амплитуды аномалии достигается только для четырёхсторонней расстановки (тип IV, рис. 5.в,е,и).

Несколько парадоксальный результат, что положение аномалии восстанавливается даже при шаге между источниками и приёмниками большем, чем размер аномалии, связан с тем, что во внутренних частях модели плотность сейсмических лучей много больше за счёт их взаимопересечения. Если аномалия будет расположена непосредственно вблизи одной из линий наблюдения, то возможность её обнаружения и точность определения её параметров будет зависеть от её расположения относительно источников и приёмников: при попадании в область между источниками аномалия вообще не будет обнаружена. Это видно из результатов инверсии синтетической модели 1.2.б, где аномалия расположена таким образом, что её положение не восстанавливается правильно для двусторонней расстановки с шагами для источников и приёмников меньше диаметра цилиндра (рис. 6.а,г). Заметим, что для данной модели положение горизонтальной приёмной линии для П-образной расстановки соответствует нижней границе модели ($z = -120$ м). Когда горизонтальная приёмная линия располагается по верхней границе модели, положение данной аномалии с использованием П-образной расстановки не реконструируется. Отметим, что при плотной системе наблюдений (шаг два метра между приёмниками и источниками), с использованием двусторонней и П-образной расстановок, положение цилиндра определяется, однако помимо этого возникают ложные аномалии-артефакты (рис. 6.ж,з). Возникновение таких артефактов объясняется неустойчивостью решения обратной задачи. В данном случае при параметризации модели не налагались требования на лучевое покрытие. При уменьшении шага по источникам-приёмникам очевидно увеличение числа лучей и, соответственно, увеличение количества относительно маленьких ячеек в параметризации модели, в которых будет производиться восстановление скоростей. В данном случае это приводит к возникновению дополнительных артефактов. При использовании четырёхсторонней расстановки артефактов не наблюдается. Остальные результаты в целом аналогичны предыдущему случаю (рис. 5).

Модели второго типа (периодически чередующиеся аномалии скорости).

«Шахматные» модели являются более сложным объектом для реконструкции методами лучевой томографии. Чередование положительных и отрицательных аномалий скорости порождает искривлённые лучевые траектории и может давать малые суммарные аномалии времён пробега даже при значительной амплитуде аномалий скорости. От конфигурации той или иной модели, геометрии расстановки зависит ход лучей и проникновение лучей в области пониженной скорости. Недостаточное лучевое покрытие таких областей даже для расстановок с большим количеством источников и приемников часто не позволяет восстановить истинные скорости отрицательных аномалий. На рис. 7 показаны лучевые траектории в моделях 2.1 -2.3 для одного из источников в левой скважине, приёмники расположены на всех остальных гранях модели (IV тип расстановки). Обращает на себя внимание тенденция к локализации траекторий в пределах высокоскоростных участков, что прямо следует из принципа Ферма: лучевая траектория соответствует пути с наименьшим временем распространения. Этот эффект более выражен для моделей «а», в которых вариации скорости больше (30% от среднего). Видно, что высокоскоростные «диагонали» формируют «магистраль» с наименьшим временем распространения.

Тенденция к локализации траекторий в пределах высокоскоростных участков приводит к тому, что низкоскоростные области оказываются плохо «освещены», т.е. информация об их структуре менее проявлена в данных и, как следствие, они хуже восстанавливаются при решении обратной задачи. Результат, впрочем, как это будет продемонстрировано ниже, существенно зависит от плотности и углового покрытия (разброса направлений лучей). Если решение обратной задачи начинается с однородной по скорости начальной модели, как это обычно бывает, то лучевые траектории в начальной модели – прямые. Поэтому при большом наборе лучей и их направлений найдутся траектории, для которых фактическое время распространения источник-приёмник меньше, чем время, рассчитанное в однородной модели. По мере уточнения модели по итерациям структура модели определяется качественно правильно. Однако в среднем скорость в таких моделях по результатам инверсии оказывается завышенной.

Обратимся к результатам решения обратной задачи для моделей второго типа, приведённым на рис. 8. Во всех случаях в качестве начальной модели при инверсии использовалась однородная модель со скоростью 3000 м/с, т.е. равной средней скорости в

среде. Для наглядности на сечения восстановленных моделей нанесена сетка исходных «шахмат».

На рис. 8.а-в представлены реконструированные распределения скоростей для моделей, соответственно, 2.1.а-2.3.а (с вариациями скорости 30% от среднего) и двусторонней расстановки. Обращает на себя внимание результат для «малых прямых шахмат», представленный на рис. 8.а. Такой артефакт инверсии в виде наклонного креста весьма характерен и является прямым следствием описанных выше особенностей распределения лучей в периодических моделях. Лучи, которые пересекают модель из угла в угол, движутся вдоль высокоскоростной «диагонали», которая успешно реконструируется. Прочие лучи движутся вдоль искривлённых траекторий с локализацией в высокоскоростных областях (см. рис. 7.а), в результате интегральное время пробега оказывается близкому ко времени пробега в начальной модели, а потому аномалии не реконструируются.

Для П-образной расстановки (рис. 8.г) добавление одной линии приёма вдоль поверхности земли заметно улучшает лучевое покрытие в верхней половине модели, поэтому здесь структура модели восстанавливается относительно правильно. Однако количественно значения скорости оказываются завышены: в низкоскоростных «клетках» они соответствуют скорости в начальной модели, а в высокоскоростных – превышают скорость в синтетической модели. Причина этого явления – также локализация лучей в пределах высокоскоростных областей, как разобрано выше. Обращает на себя внимание также формирование серии дополнительных высокоскоростных диагоналей в нижней части модели, которые соответствуют траекториям лучей от источников в скважинах к приёмникам на поверхностной приёмной линии (см. рис. 7.а).

При четырёхсторонней системе наблюдений (рис. 8.ж) структура модели правильно восстанавливается во всём объёме, абсолютные значения скоростей по-прежнему завышены.

Для модели «малых наклонных шахмат» (2.2.а) при двусторонней расстановке по результатам инверсии удаётся угадать наличие наклонных высокоскоростных «магистралей». Наличие системы перпендикулярных линий или, тем более, периодической структуры в результатах инверсии полностью теряется (рис. 8.б). Переход к П-образной расстановке мало меняет картину, даже в верхней части модели (рис. 8.д). Результат инверсии представляет собой хаотическую структуру, которую можно получить на практике в результате инверсии случайного шума. Однако четырёхсторонняя

расстановка позволяет достаточно уверенно реконструировать периодическую структуру, хотя и в более искажённом (по сравнению с результатами инверсии для модели 2.1.а) виде (рис. 8.з).

Таким образом, видим, что разрешающая способность определяется не только параметрами расстановки и размером аномалий скорости в среде, но и их ориентировкой относительно линий приёма. Также значение, очевидно, имеет ориентировка структур относительно системы ячеек, в которых определяются скорости.

В модели «больших наклонных шахмат» (2.3.а) при использовании двусторонней расстановки относительно правильно воспроизводятся наклонные высокоскоростные диагонали (рис. 8.в) в пределах которых локализуются лучи между источниками и приёмниками в скважинах (рис.7.в). Значения скорости в низкоскоростных участках приближённо равны скоростям в модели начального приближения. Использование П-образной расстановки позволяет с хорошей точностью воспроизвести периодическую структуру скорости в верхней трети модели, включая абсолютные значения (рис. 8.е). С применением четырёхсторонней расстановки структура синтетической модели воспроизводится весьма точно во всём объёме модели, как в качественном, так и в количественном отношении (рис. 8.и).

Результаты инверсии для моделей 2.1.б-2.3.б (с вариациями скорости 10% от среднего), представленные на рис. 9, в главных чертах аналогичны таковым для моделей 2.1.а-2.3.а. Таким образом, несмотря на существенное различие в форме лучевых траекторий для моделей с различной амплитудой аномалий скорости (см. рис. 7), качество их реконструкции остаётся постоянным, по меньшей мере, до аномалий скорости 30% от среднего значения. Отметим, что для реконструкции моделей 2.1.а-2.3.а (аномалии скорости 30%), которая констатировалась по прекращению уменьшения невязок времён пробега, потребовалось 8 итераций, тогда как для моделей 2.1.б-2.3.б (аномалии скорости 10%) сходимость была достигнута уже после 5 итераций. Редукция среднеквадратической невязки для моделей с аномалиями скорости 30 % составила 93 %, с аномалиями 10 % - 97%.

Выводы по результатам тестов первой группы.

Результаты тестов первой группы позволяют сделать некоторые выводы относительно зависимости разрешающей способности от параметров эксперимента и структуры моделей, в предположении, что лучевое приближение выполняется.

1. Использование традиционной двусторонней расстановки, т.е. просвечивание «из скважины в скважину», неизбежно приводит к искажению структуры аномалий. Одиночные локализованные аномалии вытягиваются в горизонтальном направлении, периодические аномалии вообще не могут быть адекватно воспроизведены и порождают артефакты инверсии в виде высокоскоростных «магистралей», соединяющих источники и приёмники.
2. Оценка разрешающей способности меняется в зависимости от того, рассматривается ли возможность восстановления локализованных или периодических аномалий скорости. Для локализованных аномалий скорости вполне точное определение их положения и амплитуды возможно при шаге между источниками и приёмниками сравнимом с размерами аномалии, даже при использовании двусторонней расстановки, т.е. традиционном межскважинном просвечивании. Форма аномалии при этом искажается, однако задача её обнаружения решается уверенно. При межскважинном просвечивании периодических аномалий возможно обнаружить лишь субгоризонтальные высокоскоростные структуры (т.е. слоистый разрез), при условии, если шаг между приёмниками в несколько раз меньше их размера.
3. Введение дополнительной линии источников (приёмников), соединяющей на поверхности устья скважин, улучшает качество реконструкции моделей всех типов в верхней части разреза, в интервале глубин $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$ глубины расстановки. На практике, однако, возможны осложнения, связанные с высокой неоднородностью верхней части разреза, которая будет оказывать искажающее влияние на результаты реконструкции.
4. Наилучшие результаты, в том числе правильное восстановление периодических аномалий во всём объёме изучаемой среды, могут быть достигнуты при использовании четырёхсторонней расстановки. При этом количественно правильно аномалии скорости восстанавливаются, если шаг между источниками и приёмниками в несколько раз меньше характерного размера аномалии и этот размер не менее $\frac{1}{4}$ расстояния между скважинами. Для аномалий меньшего размера амплитуда скорости оказывается завышенной во всех участках модели.

Отметим, что указанные выводы соответствуют идеальному случаю, когда случайный шум в данных отсутствует и потому должны рассматриваться как соответствующие теоретически достижимому пределу разрешающей способности. На практике, при наличии случайного шума, искажающего влияния приповерхностных и околоскважинных неоднородностей и эффектов волновой природы (отклонений от законов геометрической сейсмологии) результаты будут хуже.

Результаты. Вторая группа тестов.

Как указано выше, целью второй группы тестов является изучение зависимости разрешающей способности от соотношения размера неоднородностей и длины волны зондирующего импульса. Для этого был выполнен расчёт синтетических сейсмограмм с использованием метода спектральных элементов и программного пакета SPECFEM3D [Komatitsch and Vilotte, 1998]. Использовался импульс Рикера с центральной частотой 50, 100, 250, 700 и 750 Гц. Источник — типа вертикальной силы. На верхней границе модели задавалось граничное условие, соответствующее свободной поверхности, на боковых и нижней границах – граничные условия, соответствующие поглощению сейсмических волн, что имитирует их распространение в нижнем полупространстве.

Модели первого типа.

На рис. 10 показаны мгновенные снимки, в три последовательных момента времени, волнового поля, распространяющегося в модели 1.1 («большой цилиндр»), для набора центральных частот 700, 100 и 50 Гц. Соответствующие длины волн в однородной скоростной модели с $v = 2500$ м/с составляют 3, 25 и 50 м, для сравнения распространение волн данных частот в однородной среде показано на рис. 10.а. Видно, что для частоты 700 Гц (рис. 10.б) (что примерно соответствует центральной частоте сигнала, возбуждаемого скважинным электроискровым источником) волновой фронт в модели 1.1 распространяется по законам, близким к законам геометрической сейсмики. опережение волнового фронта, сформировавшееся при прохождении им высокоскоростного цилиндра, сохраняется и достигает в такой форме противоположной скважины. Напомним, внешний диаметр цилиндра составляет 36,5 м, т.е. 12 длин волн. Для частоты 100 Гц (рис. 10.в) также можно видеть деформацию формы волнового фронта, связанную с высокоскоростной неоднородностью. Для частоты 50 Гц (рис. 10.г), когда длина волны превышает размер неоднородности, визуальный анализ снимка не позволяет заметить каких-либо особенностей формы волнового фронта, связанных с неоднородностью.

Входными данными для решения обратной задачи лучевой сейсмической томографии являются времена пробега. Поэтому рассчитанные синтетические сейсмограммы необходимо «пропикировать» – выделить первые вступления, соответствующие временам пробега продольных волн, как это и делается на практике. Известно, что результаты пикирования могут существенно различаться в зависимости от принятого способа выполнения этой процедуры. На рис. 11 приводится сопоставление результатов выделения первых вступлений по уровню сигнала и на основании поиска максимума взаимной

корреляционной функции (далее – ВКФ) сигнала и формы зондирующего импульса [Nolet, 2008]. Для сравнения приводятся времена первых вступлений, рассчитанные в рамках лучевого приближения. На графиках приведены аномальные времена пробега, т.е. разница результатов пикирования и времени пробега, рассчитанного для однородной среды со скоростью 2500 м/с. Для частоты 700 Гц (рис. 11.а) результаты, полученные с использованием ВКФ, практически совпадают со временами, полученными лучевым методом. Исключение составляет небольшой участок вблизи точки сопряжения «нормального», т.е. соответствующего однородной среде, и «аномального», т.е. прошедшего через неоднородность, волнового фронта. Результаты пикирования по уровню осложнены большими погрешностями, но в целом также правильно воспроизводят «лучевые» времена. Для частоты 100 Гц (рис. 11.б) времена, полученные при помощи ВКФ, также неплохо воспроизводят результаты расчётов в лучевом приближении на большей части «аномального» участка, однако в отличие от результатов лучевого моделирования чёткой границы между «нормальным» и «аномальным» участками не видно, она как бы «размазана», что соответствует хорошо известному эффекту «залечивания» волнового фронта [Nolet, 2008]. Пикирование по уровню даёт ещё большие погрешности. Наконец для частоты 50 Гц (рис. 11.в) результаты пикирования обоими методами существенно отличаются от результатов расчётов в лучевом приближении. Для дальнейших расчетов были использованы времена вступлений, полученные при помощи ВКФ. с фильтрацией сильных выбросов, возникавших в местах, где волна от источника типа вертикальной силы имела нулевую интенсивность.

Указанные особенности волнового поля находят своё отражение в результатах решения обратной задачи в рамках лучевого приближения, представленных на рис. 12. Имитировались двусторонняя (рис. 12.а-в) и четырёхсторонняя (рис. 12.г-е) расстановки. Видим, что при частоте 700 Гц (длина волны 3 м) результаты инверсии (рис. 12.а,г), как это и следовало ожидать, практически неотличимы от результатов, полученных в первой группе тестов (ср. рис. 4.а,в), когда и прямая и обратная задачи решались с использованием лучевого приближения. При частоте 100 Гц (длина волны 25 м) наблюдается больше артефактов (рис. 12.б,д), однако и положение и амплитуда аномалии восстанавливаются неплохо. При частоте 50 Гц (длина волны 50 м) аномальная область занимает уже почти весь объём модели (рис. 12.в,е) и делать выводы о её локализации затруднительно. Наблюдаются многочисленные артефакты, как в виде вытянутых аномалий, так и в виде осцилляций скорости.

Интересно сравнить полученные результаты с характерным размером зоны Френеля, которую обычно используют в качестве оценки предела разрешающей способности [Nolet, 2008]:

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda L}, \quad (1)$$

где λ - длина волны, L - длина луча. Принимая в качестве длины луча расстояние между скважинами, получим: для частоты 700 Гц $d \approx 9$ м, для частоты 100 Гц $d \approx 23$ м, для частоты 50 Гц $d \approx 33$ м. Данные оценки являются оценками «снизу», т.е. показывают характерный размер зоны Френеля для минимального расстояния между источником и приемником. Внешний диаметр аномалии в данном случае составляет 36 метров. Видим, что результаты инверсии можно считать адекватными при условии, что размер зоны Френеля (1) меньше размера аномалии, поэтому соответствующую оценку можно считать разумной для локализованных аномалий. При размере зоны Френеля, близком или большем размера аномалии, локализация аномалии не восстанавливается.

Для модели 1.2.а («малый цилиндр» с внешним диаметром 5 м) имитационное моделирование выполнялось для двусторонней расстановки, для частот зондирующего импульса 5 кГц (длина волны во вмещающей среде 0,5 м, оценка диаметра зоны Френеля 3-4 м), 3 кГц (длина волны 0,83 м, зона Френеля 4-5 м) и 700 Гц (длина волны 3 м, зона Френеля 9 м). Видим, что если размер зоны Френеля меньше диаметра одиночной аномалии (рис. 13.а,б), то качество реконструкции близко соответствует теоретически достижимому в лучевой теории (ср. рис. 5.а). Однако в случае, когда зона Френеля превышает диаметр аномалии (рис. 13.в), реконструкция невозможна: вместо локализованной аномалии результат инверсии содержит множество артефактов, не имеющих отношения к строению среды.

Модели второго типа.

Обратимся к результатам инверсии для моделей периодического типа. На рис. 14 приводятся результаты для модели 2.3.а («большие наклонные шахматы», амплитуда аномалий скорости $\pm 30\%$ от среднего). Напомним, что расстояние между скважинами в данном случае было 30 м, глубина скважин – также 30 м. Имитационное моделирование выполнено для набора частот 750, 250 и 50 Гц и трёх рассматриваемых типов расстановок.

Для частоты 750 Гц (средняя длина волны 4 м, оценка зоны Френеля в центральной части модели 5 м для длины луча 30 м, 7 м для длины луча 43 м) результаты инверсии (рис. 14.а-в) близки к полученным в рамках лучевого моделирования (ср. рис. 14.в,е,и). Некоторое искажение формы аномалий может быть связано как с влиянием волновых эффектов, так и с погрешностями выделения первых вступлений, т.е. наличием шума в данных. Во всяком случае, следует констатировать, что при данном соотношении частотных параметров и параметров модели (размер аномалии 8 метров) лучевая сейсмическая томография даёт правильный результат.

Результаты инверсии для имитационного моделирования с центральной частотой 250 Гц (средняя длина волны 15 м, оценка зоны Френеля в центральной части модели – 10 - 11 м) несколько хуже (рис. 14.г-е), однако использование четырёхсторонней расстановки позволяет, по-прежнему, качественно правильно реконструировать периодическую структуру (рис. 14.е). При использовании двусторонней (рис. 14.г) и П-образной расстановок (рис. 14.д) результаты инверсии носят почти случайный характер и дают весьма отдалённое представление о структуре синтетической модели.

Наконец при центральной частоте 50 Гц (средняя длина волны 60 м, оценка зоны Френеля в центральной части модели – 21 м для длины луча 30 м, 25 м для длины луча 43 м) результаты инверсии практически случайны для двусторонней и П-образной расстановок (рис. 14.ж,з), однако при использовании четырёхсторонней расстановки (рис. 14.и) продолжают сохранять некоторое, хотя и значительно искажённое подобие со структурой синтетической модели.

Таким образом, результаты проведённого теста приводят к несколько парадоксальному заключению, что лучевая сейсмическая томография позволяет, хотя и со значительными искажениями, воспроизвести, на качественном уровне, структуру периодической модели в случаях, когда длина волны и размер зоны Френеля превосходят размер неоднородности, но только при условии идеального лучевого и углового покрытия, соответствующего четырёхсторонней расстановке, не реализуемой на практике. Подчеркнём ещё раз, что в приведённых тестах не учитывалось влияние случайного шума, всегда присутствующего на реальных сейсмограммах. Отметим также, что при частоте 50 Гц регистрация сейсмограмм производится в ближней зоне источника, что делает рассуждения о зоне Френеля формальными.

Выводы по результатам тестов второй группы.

Результаты тестов второй группы позволяют сделать некоторые выводы относительно зависимости разрешающей способности от соотношения частотного состава зондирующего импульса и структуры моделей:

1. Для одиночных аномалий скорости и реализуемых на практике двусторонних расстановок оценка предела разрешающей способности лучевой сейсмической томографии как размера зоны Френеля, в целом, справедлива. При размере аномалии более диаметра зоны Френеля (оценка которого выполняется для однородной среды), качество реконструируемого изображения соответствует теоретически достижимому пределу в лучевой асимптотике.
2. Также и для периодических аномалий скорости, при размере неоднородностей более или близком к диаметру зоны Френеля, качество результатов инверсии соответствует теоретически достижимому пределу в лучевой асимптотике. Таким образом, использование диаметра зоны Френеля в качестве оценки предела разрешающей способности, в целом справедливо для различных типов структуры модели.
3. При идеальном лучевом покрытии (четырёхсторонняя расстановка, наличие всех азимутов лучей во всех частях модели) качественная реконструкция структуры модели оказывается возможной даже и при длине волны и размере зоны Френеля большем, нежели размер неоднородности *в случае отсутствия случайного шума в данных*.

Заключение.

Проведённые тесты позволили сделать ряд практических выводов относительно зависимости разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии от таких параметров, как тип расстановки, шаг между источниками и приёмниками (дискретность расстановки), структура скоростной модели, полоса спектра зондирующего импульса. В качестве наиболее важных результатов, приведём следующие:

1. Традиционная двусторонняя расстановка (просвечивание из скважины в скважину) эффективна только при обнаружении локализованных аномалий скорости (одиночных объектов), при условии, что их размер больше или равен диаметру зоны Френеля, а также – при изучении субгоризонтальных структур (слоистого разреза). Двусторонняя расстановка не позволяет реконструировать периодические (чередующиеся) аномалии скорости.
2. При наличии технической возможности следует организовывать дополнительную линию наблюдений (или возбуждения) на поверхности Земли, соединяющую устья

скважин. Это позволяет заметно улучшить качество реконструкции скорости в верхней части разреза (на глубинах $\frac{1}{2}$ - $\frac{1}{3}$ глубины расстановки). При этом важно иметь в виду возможную высокую неоднородность приповерхностного (почвенного) слоя, которая может приводить к искажениям в более глубоких частях изучаемого объёма. Правильная реконструкция периодических (чередующихся) аномалий скорости во всём объёме модели возможна только при использовании четырёхсторонней расстановки, что почти никогда не встречается на практике.

3. Использование диаметра зоны Френеля в качестве оценки предела разрешающей способности лучевой сейсмической томографии справедливо, как для локализованных, так и для периодических аномалий скорости. Если размер неоднородностей больше зоны Френеля, результат инверсии близок к теоретически достижимому в лучевой асимптотике пределу, независимо от типа расстановки. Реконструкция структуры аномалий скорости (в качественном отношении) оказывается возможна и при размере неоднородностей меньше зоны Френеля, но только в случае идеального лучевого и углового покрытия (наличия плотной системы лучей всех азимутов), соответствующего четырёхсторонней расстановке, не реализуемой на практике.

Авторы благодарны к.ф.-м.н. А.А.Дучкову за плодотворные обсуждения проблемы разрешающей способности, а также С.С. Акоповой и А.Р. Григорьеву, принимавшим участие в проведении расчётов.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 14-05-31088.

Литература.

Болгаров А.Г., Рослов Ю.В.. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач // Технологии сейсморазведки. 2009. No. 1. С. 105-112.

Иванссон И. Сейсмическая томография на проходящих волнах // в сб. Сейсмическая томография с приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике. М: Мир, 1990. С. 169-198.

Тихоцкий С. А., Фокин И. В., Шур Д. Ю. Активная лучевая сейсмическая томография с использованием адаптивной параметризации среды системой вэйвлет-функций // Физика Земли. 2011. No 4. С. 67–86.

Фокин И.В., Басакина И.М, Капустян Н.К., Тихоцкий С.А. , Шур Д.Ю. Опыт применения сейсмической томографии для археологических исследований оснований и фундаментов зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, no. 2. С. 21–34.

Яновская Т. Б. Оценка разрешения в задачах сейсмической лучевой томографии // Физика Земли. 1997б. No 9. С. 76–80.

Bube K.-P. and Langan R.-T. Resolution of slowness and reflectors in crosswell tomography with transmission and reflection traveltimes //Geophysics. 2008. Vol. 73, no. 5. Pp. VE321–VE335.

Chiao L.-Y., Kuo B.-Y. Multiscale seismic tomography // Geophys.J.Int. 2001. Vol. 145. Pp. 517–527.

Komatitsch D. and Vilotte J.-P. The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures // BSSA. 1998. Vol. 88, no. 2. Pp. 368-392.

Koulakov I., Kaban M., Tesauro M. and Cloetingh S. P- and S-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data // Geophys. J. Int. 2009. No. 179. Pp. 345–366.

Leveque J.-J., Rivera L., Wittlinger G. On the use of the checker-board test to assess the resolution of tomographic inversions // Geophys. J. Int. 1993. Vol. 115. Pp. 313–318.

Nolet G. A Breviary of seismic tomography. Cambridge Univ.Press, 2008. P. 344.

Paasche H., Werban U. and Dietrich P. Near-surface seismic traveltime tomography using a direct-push source and surface-planted geophones // Geophysics. 2009. Vol. 74, no. 4 .Pp. G17–G25.

Tikhotsky S., Achauer U. Inversion of controlled-source seismic tomography and gravity data with the self-adaptive wavelet parametrization of velocities and interfaces // Geophys. J. Int. 2008. Vol. 172. Pp. 619–630

Vesnaver A. Yardsticks for industrial tomography //Geophysical Prospecting. 2008. No 56. Pp. 457–465.

Vidale John E. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions. - GE3PHYSICS, VOL. 55, NO. 5 (MAY 1990); P. 521-526

Wang Y. and Rao Y. Crosshole seismic waveform tomography – I. Strategy for real data

application // *Geophys. J. Int.* 2006. No. 166. Pp. 1224–1236.

Yordkayhun S. Detecting near-surface objects with seismic travelttime tomography: Experimentation at a test site // *Songklanakarinn J. Sci. Technol.* 2011. Vol. 33, no.4. Pp. 477-485.

Yordkayhun S., Tryggvason A., Juhlin C. A 3D seismic travelttime tomography study of the shallow subsurface at the CO2SINK project site, Ketzin, Germany // *EAGE 69th Conference & Exhibition.* 2007.

Zhang H., Thurber C. H. Estimating the model resolution matrix for large seismic tomography problems based on Lanczos bidiagonalization with partial reorthogonalization // *Geophysical Journal International.* 2007. Vol. 170, no. 1. Pp. 337–345.

Zelt C. Lateral velocity resolution from 3D seismic refraction data // *Geophysical Journal International.* 1998. Vol. 135 Pp. 1101-1112.