

А. В. Беляшов^{1✉}, П. А. Дергач,^{1,2} Г. С. Чернышов¹, Г. Ю. Зобнин^{1,2}

Методическое согласование томографического и лучевого способов построения скоростного малоглубинного разреза

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,

г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет,

г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В рамках построения малоглубинного скоростного разреза по данным первых вступлений S-волны вдоль профиля на геофизическом полигоне «Ключи» проведена оценка возможностей трех сейсмических методов: томографии, слоистой инверсии и лучевого моделирования. Комплексный анализ полученных структурно-скоростных моделей показал их совпадение на качественном уровне при некоторых количественных различиях, обусловленных методическими возможностями задействованных способов. Природа указанных различий будет изучена в дальнейших исследованиях, в том числе, и на других геологических объектах.

Ключевые слова: скоростной разрез, сейсмотомография, слоистая инверсия, лучевое трассирование

A. V. Belyashov^{1✉}, P. A. Dergach^{1,2}, G. S. Chernyshov¹, G. Yu. Zobnin^{1,2}

Methodological coordination of tomographic and ray tracing methods of constructing a velocity shallow section

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: BelyashovAV@ipgg.sbras.ru

Abstract. As part of the construction of a shallow velocity section based on the data of the first S-wave arrivals along the profile at the “Klyuchi” geophysical polygon, an assessment of the capabilities of three seismic methods was carried out: tomography, layered inversion, and ray tracing modeling. A comprehensive analysis of the obtained structural and velocity models showed their agreement on a qualitative level, with some quantitative differences due to the methodological capabilities of the methods involved. The nature of these differences will be explored in further studies, including at other geological sites.

Keywords: velocity section, seismic tomography, layered inversion, ray tracing

Введение

Существуют различные сейсмические способы построения скоростного разреза по данным первых вступлений, каждый из которых отличается определенными методическими достоинствами и недостатками. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами, позволяет не только оценить их реальные возможности, но и взаимно технически улучшить.

В данной работе описываются результаты скоростного моделирования с использованием трех методов: сейсмотомографии, слоистой инверсии и лучевого трассирования [1]. Скоростной разрез по первым вступлениям S-волн строился по данным с линейного профиля длиной 355 м (шаг ПП – 5м, шаг ПВ – 40м), отработанного на территории геофизического стационара ИНГГ СО РАН «Ключи». В качестве источника упругих колебаний использован портативный вибрационный источник [2].

Геологический разрез участка представлен тремя основными комплексами [3]: складчатым фундаментом палеозойского возраста, перекрывающими его осадочными образованиями верхнепалеогенового, неоген-четвертичного возраста и современными осадочными породами. Фундамент представлен глинистыми сланцами. Выше местами выделяются нерасчлененные неоген-четвертичные отложения, имеющие глинисто-алевролитовый состав. Комплекс современных осадочных отложений сложен субаэральными лессовидными суглинками, супесями, глинами, перекрывающихся или фациально замещающихся аллювиальными, озерно-аллювиальными, делювиальными и эоловыми отложениями. Геологический разрез представлен в табл. 1 [3], данные о глубине залегания геологических границ будут служить ориентиром при анализе результатов сейсмических построений.

Таблица 1

Геологический разрез по скважине на полигоне «Ключи»

№ пп	Описание пород	Глубина подошвы слоя, м.
1	Супесь	2.4
2	Суглинок	7.0
3	Глина	15.0
4	Глина с переслаиванием супеси	35.0
5	Глина с переслаиванием песков с галечником	46.0
6	Сланцы глинистые трещиноватые	77.0
7	Сланцы глинистые окварцованные	-

Предварительная обработка данных (корреляция виброграмм, определение времен прихода целевых волн) производились с использованием авторского программного обеспечения на языке Python и программного пакета SeisPro (ООО «Деко-геофизика СК»). Параметры вибрационного воздействия: линейный свип-сигнал в частотном диапазоне от 5 до 80 Гц длительностью 60 с.

Сейсмическая томография

На рис. 1 представлен скоростной разрез, полученный сейсмотомографическим способом [4]. Для расчетов задана линейно-градиентная стартовая скоростная модель, результирующая гладкая модель описывает пространственное распределение скорости по разрезу при отсутствии выраженных сейсмических границ. Время расчета модели составило 139 сек.

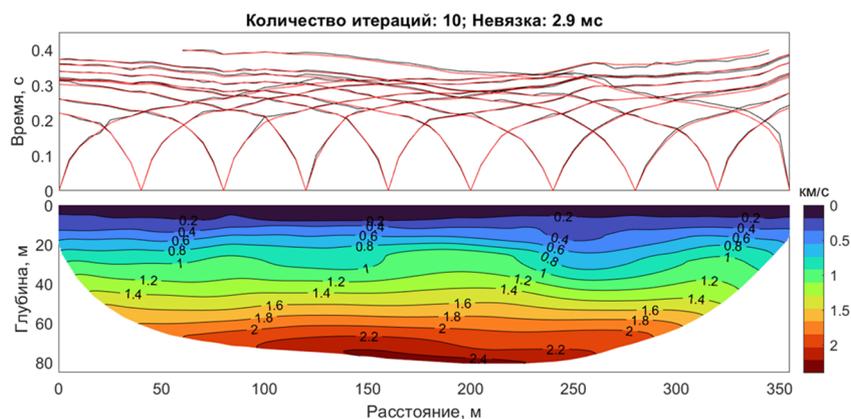


Рис. 1. Гладкая скоростная модель, полученная методом сейсмической томографии: сверху – годографы (черные – наблюдаемые, красные - модельные); снизу на модели черные линии – изолинии скорости с шагом 0.2 км/с.

Метод слоистой инверсии

Алгоритм слоистой инверсии был разработан и программно реализован в ИНГГ СО РАН и фактически является развитием метода построения пластовой модели по временам пробега головных волн, опубликованного в работе [5]. С его помощью можно выполнять построение слоистых разрезов методом томографической инверсии времен первых вступлений данных 2D и 3D сейсморазведки. В частности, алгоритм может применяться для задач инженерной сейсморазведки и глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), а также для учета неоднородностей в верхней части разреза (ВЧР) при обработке данных методом общей глубинной точки (МОВ ОГТ) путем расчета статических поправок или включения скоростной модели ВЧР в общую глубинно-скоростную модель (ГСМ) при миграции. Пластовая модель параметризуется значениями скоростей в слоях и глубинами границ с дискретизацией по латерали $[dx, dy]$, задаваемой пользователем. Скорость в слоях изменяется только в горизонтальном направлении, без учета вертикальных вариаций.

В общем случае разработанный алгоритм построения слоистых моделей состоит из трех модулей:

1. **Автоматизированное построение начальной модели.** Обработчик задает количество слоёв, координаты опорных точек, а также радиус, в котором производится осреднение годографов первых вступлений и последующая аппроксимация полученного кросс-плота кусочно-линейной функцией. В результате для каждой опорной точки строится одномерная скоростная модель с использованием способа слоистых скоростей [6], а итоговая скоростная модель (2D или 3D) является результатом их интерполяции.

2. **Лучевое трассирование.** Отличительной особенностью данной реализации является упрощенная параметризация лучей головных волн в предположении локально плоских границ. Сегменты луча падающей волны в рамках одного слоя являются отрезками, соединяющими точки преломления на границах. Скорость падающей волны соответствует скорости в ячейке модели под источни-

ком/приемником. Сегмент луча, скользящего вдоль границы – отрезок соединяющий точки головления в соответствующем слое под источником и приемником. При этом учитывается изменчивость геометрии границы между ними. Скорость головной волны описывается значением в ячейке по середине между точками головления нижнего слоя.

3. Инверсия по глубинам и скоростям. Зависимость невязок между наблюдаемыми и рассчитанными для начальной скоростной модели временами прихода является нелинейной функцией. Линеаризация выполняется путем разложения функционала в ряд Тейлора, в предположении небольших невязок параметров восстановленной модели относительно начальной. Инверсия выполняется итеративно, за одну итерацию последовательно и независимо выполняется инверсия с подбором невязок глубин и скоростей. Поиск невязок глубин слоев выполняется путем решения системы линейных уравнений – томографическая матрица производных времен прохода лучей головных волн по глубинам слева и вектором невязок времен справа. Используется регуляризация добавлением в функционал второй нормы первой производной параметров модели с весовым коэффициентом [7]. Упрощенная параметризация луча головной волны позволяет свести поиск невязок скорости в слоях к расчету коэффициентов линейной регрессии в каждой ячейке слоя независимо.

На рис. 2 представлен структурно-скоростной разрез, полученный методом слоистой инверсии. Время расчета модели составило 13 сек.

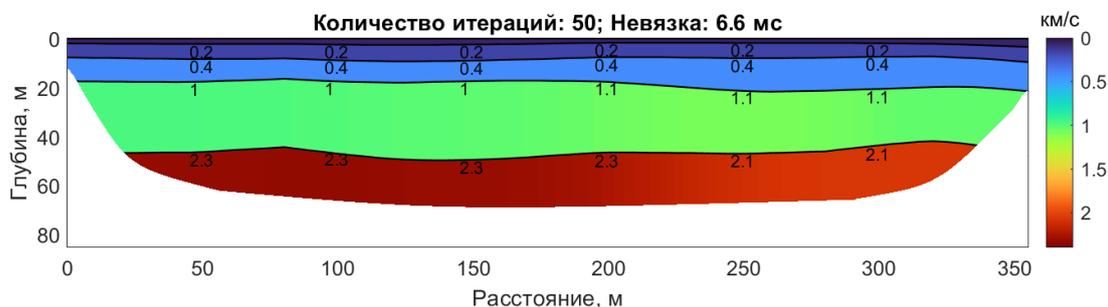


Рис. 2. Слоистая скоростная модель, полученная при помощи авторского алгоритма, разработанного в ИНГГ СО РАН (черные линии на модели – сейсмические границы со скачком скорости, значения скорости в слоях даны в км/с).

Метод лучевого трассирования

Первый этап обработки лучевым методом заключался в анализе волнового поля на системе годографов (рис. 3) для предварительной оценки структурно-скоростного разреза и формирования стартовой скоростной модели.

Выделено 5 интервалов скорости:

- самый верхний слой (светло-зеленый цвет) со скоростью ~60 м/с;
- второй слой (зеленый цвет) со скоростью ~150 м/с;
- третий слой (голубой цвет) со скоростью ~300 м/с;

- четвертый слой (синий цвет) со скоростью ~ 1000 м/с;
- подстилающее полупространство (коричневый цвет) со скоростью ~ 2000 м/с;

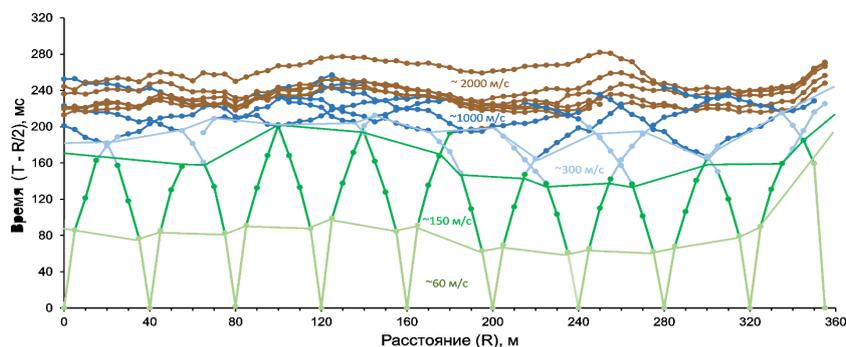


Рис. 3 Система наблюдаемых годографов S-волн в редуцированном масштабе времени ($V_{red} = 2000$ м/с). Цветом выделены интервалы с одинаковой скоростью (на графике приведены соответствующие значения скорости в м/с).

В рамках **второго этапа** обработки происходит формирование стартовой скоростной модели в программе SeisWide (Dr. Deping Chian). На базе информации о скорости и количестве слоев, полученной на первом этапе, формируется стартовая скоростная модель, при этом исходная толщина слоев неизвестна и приблизительно определяется путем подбора по одному из годографов.

Далее, для всех наблюдаемых годографов вручную осуществляется подбор скоростной модели послойно сверху-вниз путем манипуляций с рельефом границ и скорости внутри слоев, с последовательным решением прямой и обратной задач. Решение прямой задачи состоит в формировании сейсмических лучей (в случае первых вступлений – преломленно-рефрагированных волн), распространяющихся в пределах модели в соответствии с базовыми законами геометрической сейсмологии. Полученные по временам пробега модельные годографы сравниваются с наблюдаемыми. Решение обратной задачи заключается в корректировке скоростной модели. Скорость и ее градиент в слое подбирается в соответствии с углом наклона и формой наблюдаемых годографов (для соответствующих скоростных участков), глубина границы определяется положением модельного годографа по вертикальной оси. Критерием качества подобранной модели служит величина невязок между наблюдаемыми и модельными годографами.

Для чистоты эксперимента подбор скоростной модели осуществлялся независимо от результатов других методов и скважинных данных. Первый вариант был построен с результирующей среднеквадратичной невязкой (RMS) между наблюдаемыми и модельными годографами 3.65 мс. Общее время подбора модели составило порядка 3-4 дней.

Предварительное сравнение полученной модели с результатами томографии, слоистой инверсии и данными из табл. 1 показало количественное совпадение по скорости и структуре в верхней части модели, но существенные различия в нижней – высокая скорость в подстилающем полупространстве (2.7 км/с отно-

сительно 2.3 км/с) и более глубокое залегание нижней границы (55-60 м относительно 45-50 м).

Проведена корректировка скоростной модели – снижен градиент скорости в 4 слое и уменьшена скорость на кровле подстилающего полупространства до 2.3 км/с, в результате чего удалось поднять нижнюю границу до глубинного уровня 45 м (рис. 4). При этом, величина RMS временной невязки (3.59 мс) сопоставима с первоначальным вариантом, что свидетельствует о неединственности решения – основываясь только на критерии временных невязок для одного набора исходных данных можно подобрать разные варианты скоростных моделей, соответственно, желательно обладать априорной информацией об основных особенностях структурно-скоростного строения изучаемого геологического разреза.

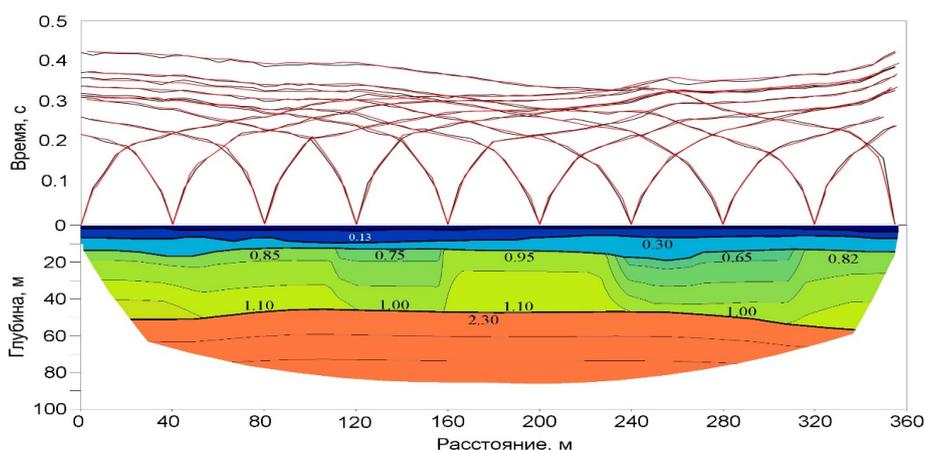


Рис. 4. Финальный вариант скоростной модели, построенной методом лучевого трассирования: сверху – годографы (черные – наблюдаемые, красные – модельные); снизу на модели толстые черные линии – сейсмические границы со скачком скорости, тонкие – изолинии скорости с шагом 0.1 км/с, значения скорости в слоях даны в км/с.

Сравнительный анализ результатов

Комплексный сравнительный анализ результатов построения структурно-скоростных моделей разными сейсмическими способами и скважинных данных показал их совпадение на качественном уровне при некоторых количественных различиях, обусловленных методическими возможностями задействованных способов.

Сопоставление по скоростным параметрам. Характер распределения скорости S-волн в пределах верхней части разреза (до глубины порядка 40 м) с областями понижения скорости в интервалах профиля 120-150 и 240-300 метров хорошо совпадает для томографической и лучевой моделей (см. рис. 1 и 4). Но на больших глубинах численные значения скорости начинают различаться – в томографической модели происходит плавное увеличение скорости от 1.6 км/с на глубине ~50 м до 2.3 км/с на глубине ~70 м, в то время как на лучевой модели

скорость резко увеличивается до 2.3 км/с на кровле подстилающего полупространства на глубине порядка 45 м.

Модель слоистой инверсии (см. рис. 2) характеризуется увеличенными до 1.1 км/с (относительно 0.7-0.8 км/с для других моделей) значениями скорости на глубине порядка 20 м. При этом, скорость на кровле подстилающего полупространства (2.3 км/с) полностью совпадает с данными по лучевой модели.

По критерию RMS временной невязки лучший показатель у томографии – 2.9 мс (10 итераций), для лучевого трассирования – 3.6 мс, для слоистой инверсии – 6.6 мс (50 итераций).

Сопоставление по структуре. Положение границ сравнивалось для слоистой и лучевой моделей (рис. 5) с ориентировкой на скважинные данные.

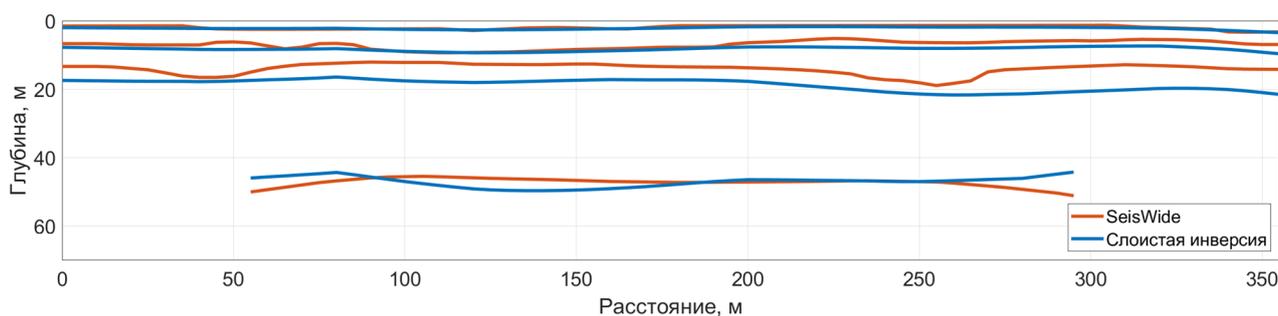


Рис. 5. Сравнение положения сейсмических границ, выделенных слоистой инверсией (синие линии) и лучевым трассированием (красные линии).

Прежде всего, в результатах обоих сейсмических методов отсутствует граница на глубине 35 м, выделяемая по скважинным данным (табл. 1). Предположительно, эта геологическая граница разделяет горные породы, слабо различающиеся по скоростным свойствам.

Далее необходимо отметить, что сейсмические границы, определенные методом лучевого трассирования, хорошо совпадают по глубине с геологическими границами (табл. 1). Для слоистой инверсии 3-я граница оказалась несколько глубже – на уровне 19-20 м относительно 15 м для скважинных данных. Остальные границы по методам слоистой инверсии и лучевого трассирования совпадают.

Изучение природы выявленных структурно-скоростных различий, а также исследования по оценке возможностей сейсмических методов в целом будут продолжены на других участках с разными геологическими условиями.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 “Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zelt, C. A. Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure / C. A. Zelt, R. B. Smith // *Geophys. J. Int.* – 1992. – V. 108. - P. 183-204.
2. Дергач П.А., Яблоков А.В., Полозов С.С., Зобнин Г.Ю., Дучков А.А. Результаты полевого тестирования портативного вибрационного источника поперечных волн для задач детального изучения верхней части геологического разреза // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 237–250.
3. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Шапаренко И.О. Применение метода электротомографии для выявления электрической анизотропии разреза на полигоне Ключи // *Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: Материалы XVI международной конференции (20-24 апреля 2020, Новосибирск) / Сетевое электронное издание. – Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – Новосибирск. 2020. – с. 718-725.*
4. Никитин и др. ST3D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – 2020.
5. Hampson, D. and Russell, B., 1984, First-break interpretation using generalized linear inversion, *J. Can. Soc. Expl. Geophys.*, 20,40-50.
6. Бондарев В.И. Сейсморазведка. – Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, 2007, 703 с.
7. Tarantola A. Inverse problem theory and methods for model parameter estimation. // *Society for industrial and applied mathematics.* – 2005. – P. 342.

© А. В. Беляшов, П. А. Дергач, Г. С. Чернышов, Г. Ю. Зобнин, 2025