

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

Институт наук о Земле  
Кафедра геофизики

*ЛЕВИН Илья Сергеевич*

**Выпускная квалификационная работа**

*«Применение поверхностно-волновой томографии для решения инженерно-геологических задач»*

Бакалавриат, 4 курс

Направление 05.03.01 «Геология»

Научный руководитель:  
к.г.-м.н., доцент В.В. Половков

Заведующий кафедрой:  
д.г.-м.н., проф. К.В. Титов

Рецензент:  
к.ф.-м.н., с.н.с. А.В. Пономаренко

Санкт-Петербург

2020

Содержание:

Введение.....	3
1. Обзор метода поверхностно-волновой томографии .....	4
1.1. Особенности распространения поверхностных волн в среде.....	4
1.2. Метод Дитмара-Яновской .....	7
1.3. Применение метода поверхностно-волновой томографии .....	10
2. Моделирование данных .....	13
2.1. Оценка корректности метода .....	13
2.2. Выбор системы наблюдения .....	16
2.3. Параметр регуляризации .....	22
2.4. Разрешающая способность метода.....	24
3. Экспериментальные данные.....	29
Выводы .....	36
Список литературы: .....	37

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение верхней части разреза - одна из важных задач, которые необходимо решать при проведении инженерных работ. Анализируя сейсмические данные, удаётся установить различные физические характеристики приповерхностной зоны, которые, в свою очередь, позволяют оценить свойства грунтов и выделить локальные неоднородности. В последнее время для эффективного решения данной задачи рассматриваются, в том числе, и методы, использующие в качестве целевых поверхностные волны.

Метод поверхностно-волновой томографии на сегодняшний день широко применяется в области сейсмологии при исследовании верхней мантии и глубинной части земной коры. В данной работе будет рассмотрена возможность использовать метод в инженерной сейсморазведке.

Актуальность работы заключается в том, что возможности метода поверхностно-волновой томографии представляют большой практический интерес: поверхностно-волновая томография позволяет получать 3D модели среды, проводить удаленное изучение объектов, а также обладает потенциально лучшим пространственным разрешением, чем широко используемый метод обработки поверхностных волн MASW.

Цель работы: оценить возможности применения поверхностно-волновой томографии для изучения верхней части разреза.

Задачи работы:

1. Изучить опубликованную литературу по теме исследования;
2. Изучить алгоритм Дитмара-Яновской для выполнения поверхностно-волновой томографии и его программную реализацию на языке MATLAB;
3. С использованием модельных данных оценить разрешающую способность метода и дать рекомендации по выбору системы наблюдений;
4. Продемонстрировать работоспособность метода на экспериментальных данных.

# 1. ОБЗОР МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНО-ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ

## 1.1. Особенности распространения поверхностных волн в среде

Поверхностные волны – тип упругих колебаний, возникающих при наличии границы между упругими средами. Также, как и в случае с объемными волнами, можно выделить различные типы поверхностных волн в зависимости от их поляризации. При наземных исследованиях чаще всего наблюдаются P-SV поляризованные волны Рэлея и горизонтально (SH) поляризованные волны Лява. Также можно выделить несколько подтипов: волны Стоунли (распространяющиеся на границе двух твердых сред), волны Шольте (на границе между жидкостью и твердой средой) (Bohlen и др., 2004; Voiero, Wiarda, Vermeer, 2013; Klein и др., 2005; Kugler и др., 2007).

Поверхностная волна Рэлея распространяется вдоль свободной границы упругого полупространства (вдоль границы упругого полупространства и достаточно разреженной газовой среды – т.е. вдоль поверхности среды). Эта волна не проникает глубоко в полупространство, распространяется вдоль его поверхности со скоростью  $V_R < V_S$  и имеет цилиндрическую форму фронта волны (Боганик, Гурвич, 2006). Рассмотрим подробнее её свойства.

Волна Рэлея вызывает одновременно деформацию сдвига и объема, а её интенсивность экспоненциально убывает с удалением от поверхности. Фактически она существует только в слое толщиной равной длине волны. В случае монохроматической поверхностной волны с периодом  $T$  горизонтальная  $u$  и вертикальная  $w$  составляющие смещения частиц среды могут быть описаны следующими формулами (Боганик, Гурвич, 2006):

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= C \left( e^{-\frac{\zeta}{\lambda_R} z} - \frac{\varepsilon \delta}{\pi} e^{-\frac{\varepsilon}{\lambda_R} z} \right) e^{j \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{V_R} \right)} \\ w(x, y, z) &= C \left( 2\delta e^{-\frac{\varepsilon}{\lambda_R} z} - \frac{\zeta}{2\pi} e^{-\frac{\zeta}{\lambda_R} z} \right) e^{j \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{V_R} + \frac{T}{4} \right)} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C$  – произвольная постоянная,  $V_R$  – скорость волны Рэлея,  $\lambda_R$  – длина волны Рэлея, постоянные  $\zeta, \varepsilon, \delta$  могут быть выражены через отношения  $\frac{V_R}{V_S}$  и  $\frac{V_S}{V_P}$ .

Скорость волны  $V_R$  зависит от коэффициента Пуассона (то есть от отношения  $\frac{V_S}{V_P}$ ), но эта зависимость проявляется слабо и при изменении коэффициента Пуассона от 0 до 0.5

отношение  $\frac{V_R}{V_S}$  изменяется в пределах от 0,87 до 0,96, поэтому можно считать, что волна Рэлея распространяется вдоль свободной поверхности полупространства со скоростью  $V_R \approx 0,9V_S$ . Волна Рэлея, образуемая на свободной границе абсолютно упругого однородного полупространства, не имеет частотной дисперсии, то есть её скорость в однородной среде не зависит от частоты колебаний.

Из уравнения (1) следует, что интенсивность колебаний экспоненциально убывает с глубиной  $z$ , причем составляющие  $u$  и  $w$  различаются по амплитуде и сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ . Следовательно, в поверхностной волне Рэлея колебания частиц среды эллиптически поляризованы в вертикальной плоскости, а видимая интенсивность наблюдается только до глубины равной длине волны (Боганик, Гурвич, 2006). Рассмотрим зависимость компонент смещения в волне Рэлея и траектории колебаний частиц от глубины (Рисунок 1) для некоторого среднего значения коэффициента Пуассона. На поверхности среды вертикальная компонента больше горизонтальной, движение частиц происходит по вертикально вытянутому эллипсу против движения волны. На некоторой глубине компоненты уравниваются друг друга, эллипс превращается в окружность. При дальнейшем увеличении глубины, горизонтальная компонента начинает преобладать над вертикальной, это превращает окружность в вытянутый по горизонтали эллипс. Чем больше длина волны, то есть ниже частота колебаний, тем глубже они проникают внутрь среды (Воскресенский, 2010).

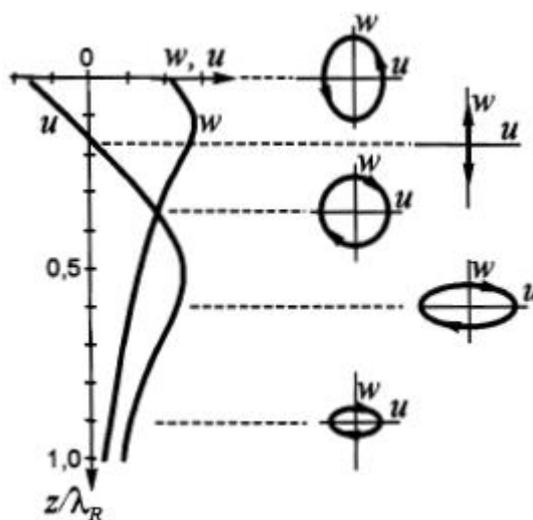


Рисунок 1. Зависимость компонент смещения и траектории колебания частиц от глубины для поверхностной волны Рэлея (Воскресенский, 2010).

С удалением от источника колебаний интенсивность поверхностной волны Рэлея относительно интенсивности объемных волн возрастает. Это связано с особенностью распространения волны Рэлея в трехмерном пространстве, оно происходит в объеме цилиндрического слоя кругового сечения высотой  $h$  (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Высота цилиндра  $h$  определяется мощностью слоя, в котором происходит распространение колебаний ( $h \sim \lambda_R$ ). При длительности колебаний  $\delta t$  толщина слоя  $\delta r = V_R \delta t$ , а его объем на удалении от источника составляет  $W(r) = 2\pi r h \delta r$ . Плотность энергии волны обратно пропорциональна объёму, в котором распространяется волна, т.е. плотность энергии волны убывает с расстоянием как  $\frac{1}{r}$ . Учитывая квадратичную связь амплитуды колебаний с плотностью энергии, амплитуда волны Рэлея уменьшается с расстоянием пропорционально  $\frac{1}{\sqrt{r}}$ . У объемных волн амплитуда уменьшается пропорционально  $\frac{1}{r}$ . Таким образом, при удалении от источника колебаний интенсивность объемных волн становится меньше, чем у поверхностной волны Рэлея (Воскресенский, 2010).

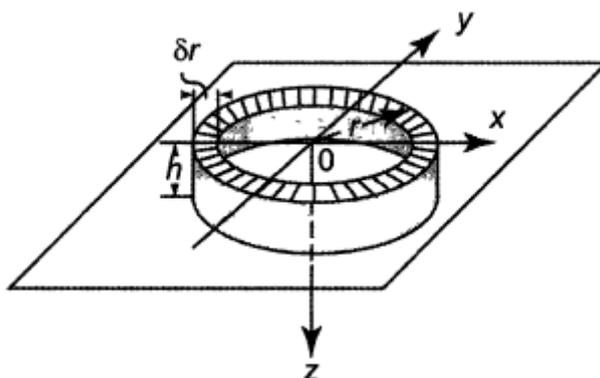


Рисунок 2. Распространение волны Рэлея в объеме цилиндрического слоя (Боганик, Гурвич, 2006).

В случае вертикально-неоднородного полупространства вместо поверхностных волн Рэлея будут регистрироваться одна или несколько поверхностных волн, каждая из которых будет характеризоваться своей скоростью для некоторого значения частоты – проявляется свойство частотной дисперсии. Такие волны называют гармониками или модами рэлеевского типа, отсчет ведется с нулевой гармоники, которая существует для любого значения частоты, начиная от нуля (в отличие от высших мод) и наиболее близка по своим свойствам к волне Рэлея; ее также называют фундаментальной (Бондарь, 2003). Для простоты, как и в случае однородной среды, такие волны называют волнами Рэлея.

Отличительные признаки поверхностной волны Рэлея (чаще всего, регистрируется фундаментальная мода) на сейсмограммах это: 1. Интенсивные амплитуды; 2. Низкие групповые и фазовые скорости (300-800 м/с); 3. Низкие преобладающие видимые частоты (5-30 Гц) (Бондарь, 2003).

В вертикально-неоднородном полупространстве помимо волны Рэлея распространяется также другой тип поверхностных волн – SH волны Лява. Самая простая модель, в которой могут распространяться такие волны – упругий слой на упругом полупространстве, при котором скорость поперечных волн в слое ( $V_{s1}$ ), который покрывает упругое полупространство, должна быть ниже скорости поперечных волн в самом полупространстве ( $V_{s2}$ ). Механизм образования поверхностных волн Лява следующий – они образуются за счет интерференции многочисленных отражений от кровли и подошвы слоя. Скорость волны Лява также как и у волны Рэлея в вертикально-неоднородной среде зависит от частоты и находится в диапазоне:  $V_{s1} < V_L < V_{s2}$ . (Воскресенский, 2010). На практике поверхностные волны Лява используются реже, поэтому более подробно рассматривать их не будем.

## 1.2. Метод Дитмара-Яновской

Сущность метода сейсмической томографии - оценка распределения фазовых или групповых скоростей сейсмических волн в среде по конечному числу данных о временах пробега волн по разным трассам, пересекающим область исследования. Преимущество использования поверхностных волн (томографии на поверхностных волнах по сравнению с томографией по объёмным волнам) заключается в том, что они (в отличие от объёмных волн) распространяются только в двух горизонтальных направлениях, поэтому их скорости можно определить из двумерной томографии, тогда как для объёмных волн необходимо использовать трехмерную томографию. А недостающую информацию о трехмерном распределении скоростей в среде можно получить благодаря такой особенности поверхностных волн в вертикально-неоднородной среде как зависимость скорости от длины волны или периода колебаний (Яновская, 2015).

В результате получается, что для определения трехмерного распределения скоростей необходимо решить две задачи. Первая – двумерная задача томографии для поверхностной волны для набора периодов (набора частот), вторая - одномерная обратная задача восстановления локальных вертикальных скоростных разрезов. Решение первой задачи находится в виде определения поправок к некоторому выбранному начальному распределению скоростей. Решение второй осуществляется за счет обработки данных для выбранных трасс на разных частотах (Яновская, 2015).

Еще одно важное допущение, которое позволяет сделать поверхностные волны, заключается в том, что в приближении слабой неоднородности горизонтальной среды характеристики волн локально определяются так же, как и в горизонтально-однородной среде. И в начальном приближении такой модели скорости выбираются постоянными, следовательно трассы являются прямыми линиями (Яновская, 2015).

В качестве реализации метода поверхностно-волновой томографии рассмотрим метод Дитмара-Яновской, успешно применяемый в сейсмологии для решения задач по определению скоростного строения коры и верхней мантии.

Преимущество метода Дитмара-Яновской заключается в том, что решение томографической задачи определения поправок к некоторому начальному распределению скорости поверхностной волны при фиксированном значении частоты (или периода) представляется в виде разложения по специальным базисным функциям, которые позволяют построить решение аналитически (Яновская, 2015).

Каждая задача сейсмической томографии, основанная на данных о временах пробега волны по разным трассам, формулируется как поиск функции  $V(\mathbf{r})$  ( $\mathbf{r} \in (2D, 3D)$ ) по набору данных о средних скоростях вдоль трасс (Яновская, 2015):

$$t_i = \int_{L_i} \frac{ds}{v(r)}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

При такой постановке задача является нелинейной, так как трасса  $L_i$  зависит от неизвестного распределения скорости. Если имеет место быть случай, когда распределение мало отличается от заданного начального приближения  $V_0(r)$ , то разность между наблюдаемым временем пробега и вычисленным для начального распределения скорости линейно связана с поправкой к медленности  $\delta S(r) = V^{-1}(r) - V_0^{-1}(r)$  (Яновская, 2015):

$$\delta t_i = \int_{L_0} \delta S(r) ds \quad (3)$$

При этом интегрирование в (3) производится вдоль трассы, соответствующей начальному распределению скорости.

Теперь необходимо разбить исследуемую область на набор ячеек с помощью сетки, в каждой из ячеек будем считать искомое значение скорости постоянным:

$$\delta t_i = \sum_j A_{ij} \delta S_j \quad (4)$$

Для удобства вместо размерных величин, которыми являются поправки к медленности, можно перейти к безразмерным, а именно относительным поправкам к медленности  $m_j = V_0 \delta S_i$ . В итоге получаем уравнение:

$$\delta t_i = \sum_j \tau_{ij} m_j \quad (5)$$

где  $\tau_{ij} = A_{ij}/V_0$ . В векторном виде уравнение (5) может быть записано как  $Tm = \delta t$ .

Так как любые измерения содержат ошибки, искомые поправки к медленности оцениваются из минимизации функционала:

$$\Phi(m) = (Tm - \delta t)^T (Tm - \delta t) + \alpha \Omega(m) \quad (6)$$

где  $\Omega(m)$  – стабилизирующий функционал, который должен выбираться на основе априорных предположений о поведении скорости,  $\alpha$  – параметр регуляризации.

В методе Дитмар-Яновской в качестве априорного предположения об изменении скорости принято условие ее гладкости, поэтому стабилизирующий функционал принимает вид  $\Omega(m) = \iint |\nabla m(r)|^2 dr$ , кроме того вводится ограничение на искомую функцию на бесконечности  $m(r) = const$ . Тогда минимизирующий функционал записывается так:

$$\Phi(m) = (Tm - \delta t)^T R^{-1} (Tm - \delta t) + \alpha \iint |\nabla m(r)|^2 dr \quad (7)$$

Можно показать (см. (Яновская, 2015)), что минимуму функционала (7) удовлетворяет следующее решение, выраженное через базисные функции  $\psi(r)$ :

$$m(r) = \sum_i \lambda_i \psi_i(r) + C = \psi^T \Lambda + C \quad (8)$$

Вместе с условием на бесконечности  $m(r) = const$  получается система линейных уравнений. Решая эту систему, определяем  $m(r)$  (Яновская, 2015).

### 1.3. Применение метода поверхностно-волновой томографии

Несмотря на то, что в сейсмологии поверхностно-волновая томография широко применяется уже с 1980-х годов (Yanovskaya, Ditmar, 1990), в инженерной сейсморазведке данный метод начали использовать лишь в XXI веке (Alyousuf и др., 2017; Boiero, Wiarda, Vermeer, 2013; Ikeda, Tsuji, 2018; Long, Kocaoglu, 2001; Rector и др., 2015). Рассмотрим более детально один из примеров применения.

Так, в статье 2001 года Long L.T. и Kocaoglu A.H. (Long, Kocaoglu, 2001) провели наблюдения поверхностных волн и применили метод поверхностно-волновой томографии с целью обнаружения закопанной на глубине 4 метра траншеи на участке размером 30 на 30 метров. Для исследования использовали 16 источников и 16 приемников, расставленных по периметру области с шагом 1,8 метра (Рисунок 3) (Long, Kocaoglu, 2001).

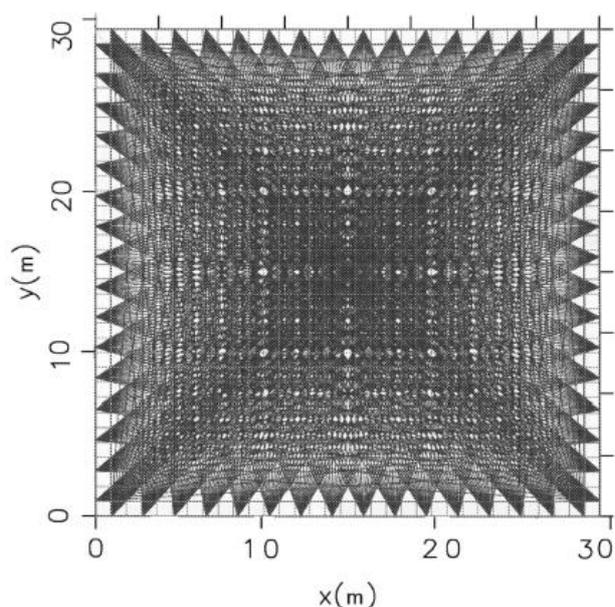


Рисунок 3. Геометрия лучей для прямоугольной тестовой зоны, показывающая плотность траекторий лучей, из статьи Long, Kocaoglu (Long, Kocaoglu, 2001).

Источником колебаний выступала кувалда, приемниками геофоны. В результате были получены сейсмограммы ОПВ, по которым в ходе обработки узкополосной фильтрацией (серией фильтров от 16 до 50 Гц) были измерены групповые скорости волны Рэлея. По полученным данным были восстановлены распределения групповых скоростей поверхностной волны Рэлея для некоторого набора частот (Рисунок 4), и затем был получен полноценный 3D разрез, который позволил успешно обнаружить искомый объект (Рисунок 5) (Long, Kocaoglu, 2001).

Для получения групповых скоростей использовали метод множественной фильтрации. Суть метода в том, что за счет узкополосных фильтров получают времена прихода поверхностных волн в интервале заданных частот. В этом эксперименте интервал составлял от 16 до 50 Гц. Затем в отфильтрованном сигнале определялось положение пика мгновенной амплитуды, по которому можно оценить групповые скорости. Для получения мгновенной амплитуды вычислялся аналитический сигнал (Long, Kocaoglu, 2001).

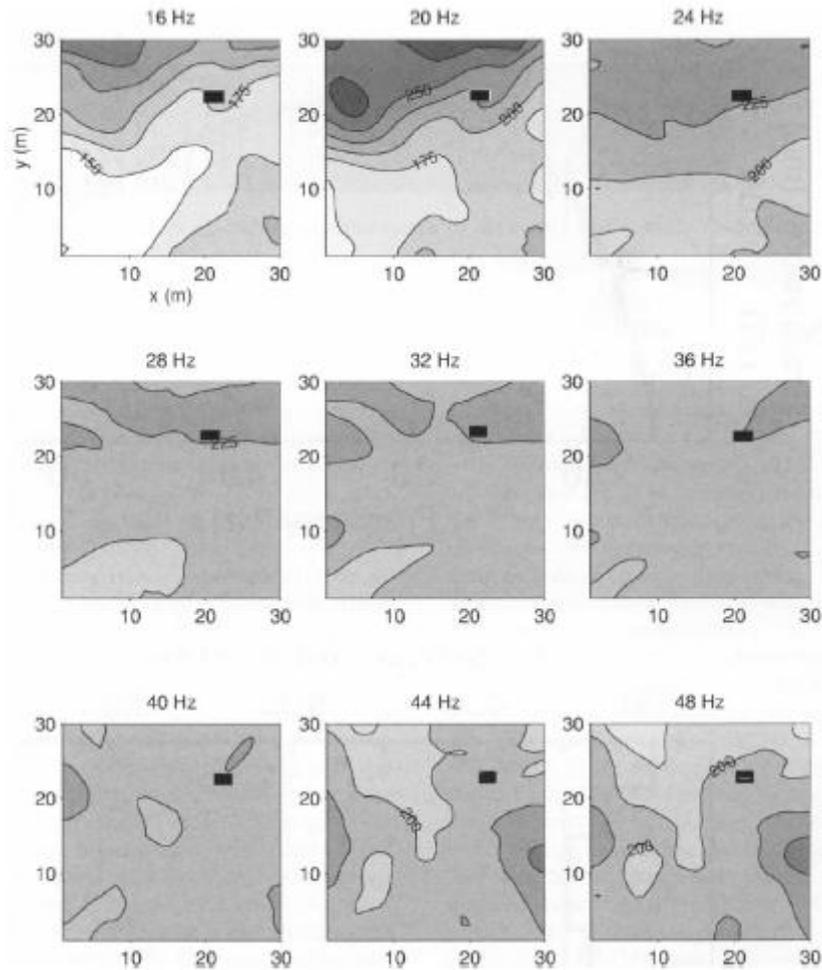


Рисунок 4. Томографические изображения распределения групповой скорости поверхностной волны на частотах от 16 до 48 Гц с интервалом 4,0 Гц. Контурными линиями показаны значения групповой скорости в м/с. (Long, Kocaoglu, 2001).

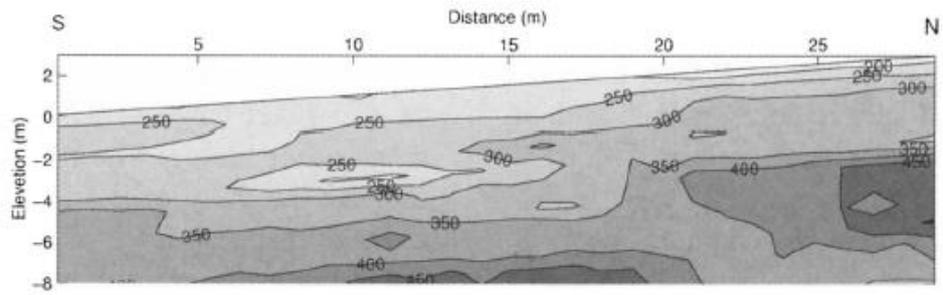


Рисунок 5. Структурный разрез, простирающийся с юга на север в центре исследуемой области. Контурными линиями обозначены значения скорости поперечной волны в м/с. (Long, Kocaoglu, 2001).

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ

### 2.1. Оценка корректности метода

Для расчета скорости по методу поверхностно-волновой томографии при условии слабо-неоднородной по горизонтали среды используется приближение, согласно которому лучи считаются прямыми (Long, Kocaoglu, 2001; Яновская, 2015). Это приближение противоречит одному из основополагающих принципов сейсморазведки – принципу Ферма, который говорит о том, что форма сейсмического луча совпадает с траекторией, вдоль которой время пробега волны минимально (Бондарь, 2003). Из этого принципа следует, что лучи будут прямыми, если среда однородная и изотропная. Реальные среды почти всегда неоднородные, поэтому лучи становятся криволинейными.

Для того, чтобы продемонстрировать работоспособность алгоритма поверхностно-волновой томографии на прямых лучах без учета принципа Ферма (по методу Дитмара-Яновской, реализованного на языке MATLAB), было проведено тестирование с использованием синтетических данных, полученных в программных пакетах Tesserat и X-Tomo. Так как 3D моделирование поверхностных волн - довольно трудоемкая задача, при тестировании использовался принципиально схожий подход межскважинной томографии на прямых волнах.

Для проведения моделирования было выбрано 6 расстановок (Рисунок 6) сочетания которых позволят в дальнейшем сравнить между собой различные расстановки. Для моделирования была создана модель со скоростью 1750 м/с (Рисунок 7), которая содержит в себе локальные неоднородности с различными скоростями распространения волн: 2000 м/с, 1900 м/с, 1600 м/с и 1500 м/с.

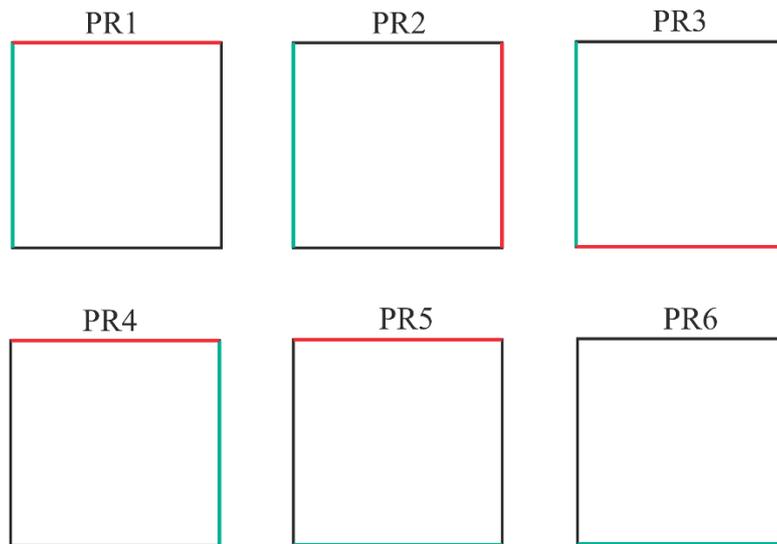


Рисунок 6. Схема взаимного расположения источников и приемников при проведении моделирования. Красные линии – источники, зеленые линии – приемники.

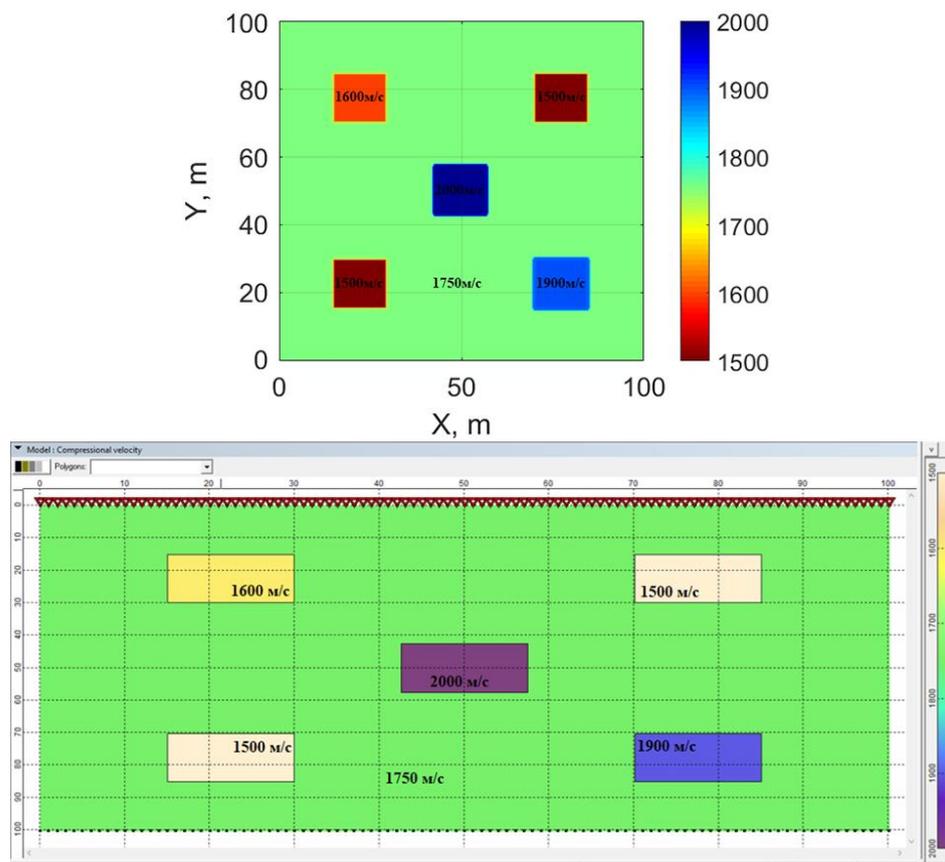


Рисунок 7. Изображение модели, созданной для тестирования алгоритма. В нижней половине рисунка скрин-пример построения модели в программе Tesseract 2D (масштаб нижнего рисунка отличен от верхнего).

Размер модели: 100 метров в ширину, 100 метров в глубину. Размер локальных включений 15 метров в ширину, 15 в глубину. Шаг между источниками – 1 метр, шаг между приемниками – 1 метр. Источники и приемники расставлялись по разным сторонам модели согласно расстановкам, представленным на *Рисунок 6*. Параметры моделирования: частота – 500 Гц, время регистрации – 0,15 с, шаг дискретизации – 250 мс. Пикирование проводилось по первым вступлениям.

Моделирование в X-Tomo проводилось для той же модели, но расстановка источников и приёмников производилась по полному периметру модели с шагом 1 метр.

Отличие моделирования синтетических данных в X-Tomo от Tesseral 2D заключается в том, что Tesseral строит волновое поле методом конечных разностей, решая волновое уравнение с некоторой точностью. Поэтому для тестирования алгоритма томографии времена первых вступлений были пропикированы. В свою очередь X-Tomo строит лучи с учетом основных принципов и законов геометрической сейсмологии, решая лучевые уравнения в неоднородной среде, а также определяет времена хода волны по построенным лучам. Кроме того, X-Tomo позволяет решать томографическую задачу по построенным лучам.

Первые вступления волн по данным, полученным в Tesseral, были пропикированы по наборам данных с PR1, PR2, PR4, PR5, PR6 (в соответствии с *Рисунок 6*). Профиль PR3 был пропикирован с ошибками, поэтому было принято решение не использовать его. Сравнение исходной модели и полученного результата показано на *Рисунок 8*. Отсутствие данных по PR3 дает растяжение аномалии в левом нижнем углу (там, где и отсутствуют данные по PR3). Для уменьшения времени расчёта томографического результата пропикированные времена равномерно прорежены: были оставлены лишь те трассы, координаты источника и приёмника для которых кратны 10 м.

Результаты восстановления модели среды по данным, полученным в программе X-Tomo представлены на *Рисунок 9*. Полученные с помощью программы времена хода волн по рассчитанным лучам были прорежены как в предыдущем примере - были оставлены лишь трассы, координаты источника и приёмника для которых кратны 10 м. Прореживание трасс было проведено для уменьшения времени расчёта томографии по методу Дитмара-Яновской.

Проведенные тесты алгоритма поверхностно-волновой томографии позволили получить распределения скоростей, которые вполне отвечают заданной модели, а также результату томографии в программе X-Tomo, даже несмотря на проведённое прореживание трасс, которое приводит к сглаживанию результатов (по сравнению с заданной моделью и результатом по полному набору трасс, полученному в X-Tomo). Это позволяет утверждать,

что алгоритм работает корректно, а приближение о прямолинейности лучей не очень существенно влияет на результат восстановления среды (для рассмотренной модели).

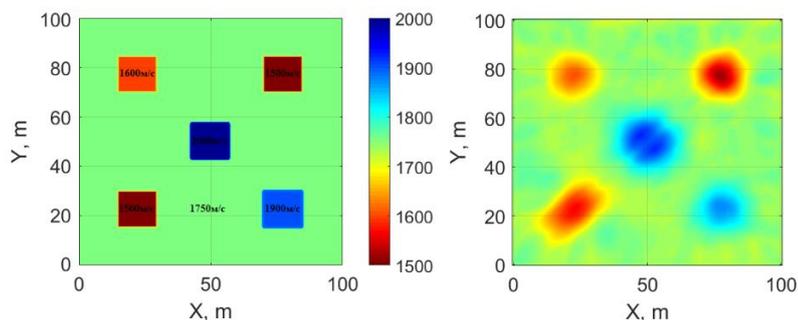


Рисунок 8. Решение обратной задачи с применением алгоритма поверхностно-волновой томографии, по синтетическим данным, полученным в программе Tessleral 2D. Слева – заданная модель. Справа – результат томографии по методу Дитмара-Яновской (примечания см. в тексте). Скорость в палитре указана в м/с.

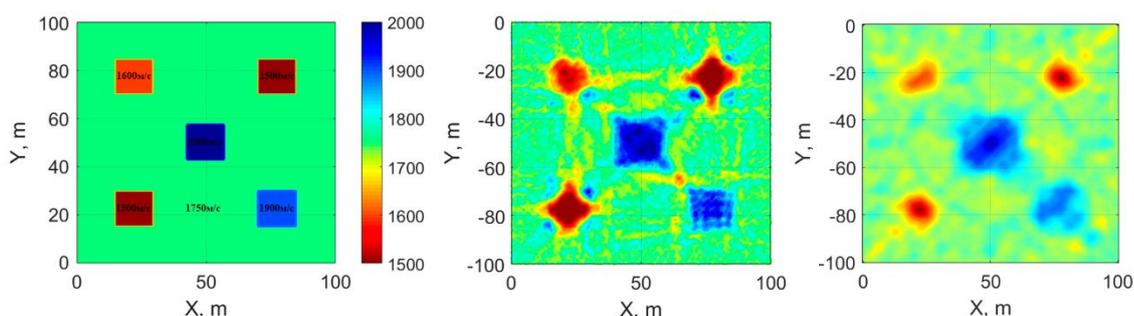


Рисунок 9. Решение обратной задачи с применением алгоритма поверхностно-волновой томографии, по синтетическим данным, полученным в программе X-Tomo. Слева – заданная модель. Справа - результат томографии по методу Дитмара-Яновской (примечания см. в тексте). По центру – результат томографии в самой программе X-Tomo по всем рассчитанным лучам. Скорость в палитре указана в м/с.

## 2.2. Выбор системы наблюдения

Под сейсмической томографией подразумевается метод определения распределения скоростей за счет множественных наблюдений с использованием различных комбинаций расположения источников и приемников. В отличие от межскважинной томографии, в которой источники и приемники располагаются в скважинах, в случае поверхностно-волновой томографии они располагаются на поверхности земли, а исследуемой областью является участок земли, ограниченный приборами.

Основными параметрами систем наблюдения в случае поверхностно-волновой томографии являются шаг между источниками, шаг между приемниками и расположение приемной и возбуждающей линий друг относительно друга.

Используем данные о временах прихода прямой волны, полученные в программе X-Tomo (см. главу 2.1 Оценка корректности метода). За счет объединения данных по разным «профилям» (основываясь на вариантах в соответствии с Рисунок б) оценим различные варианты расположения линий и сделаем выводы о том, какая система наблюдений позволит наиболее качественно и с наименьшими затратами восстановить изображение среды.

Сначала рассмотрим зависимость формы аномалий от направления лучей на примере двух отдельных профилей под номерами PR5 (Рисунок 10) и PR2 (Рисунок 12).

В ходе сравнения полученных изображений, прослеживается четкая зависимость между преимущественным направлением лучей и формой аномалий. Так на Рисунок 11 видно, что аномалии вытягиваются в направлении от источников к приемникам. Аналогичная ситуация наблюдается на Рисунок 13.

Главный вывод, который можно сделать заключается в том, что изучаемая область должна быть покрыта лучами во всех направлениях, чтобы избежать искажения формы аномалий.

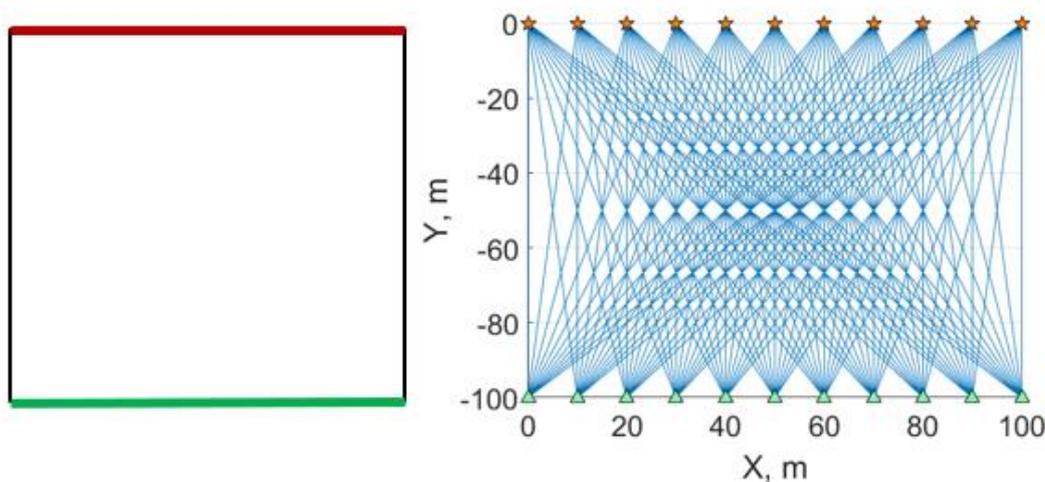


Рисунок 10. Лучевая схема (справа) и расположение источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом) при моделировании PR5.

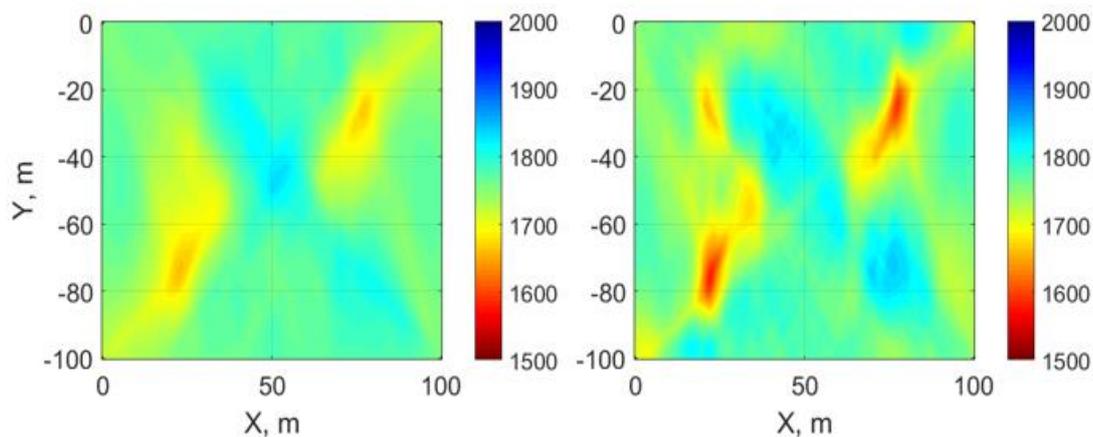


Рисунок 11. Восстановление скоростей с применением алгоритма по данным с PR5. Слева шаг между пунктами взрыва - 10 метров, пунктами приема - 10 метров, справа шаг между пунктами взрыва - 2 метра, пунктами приема - 2 метра.

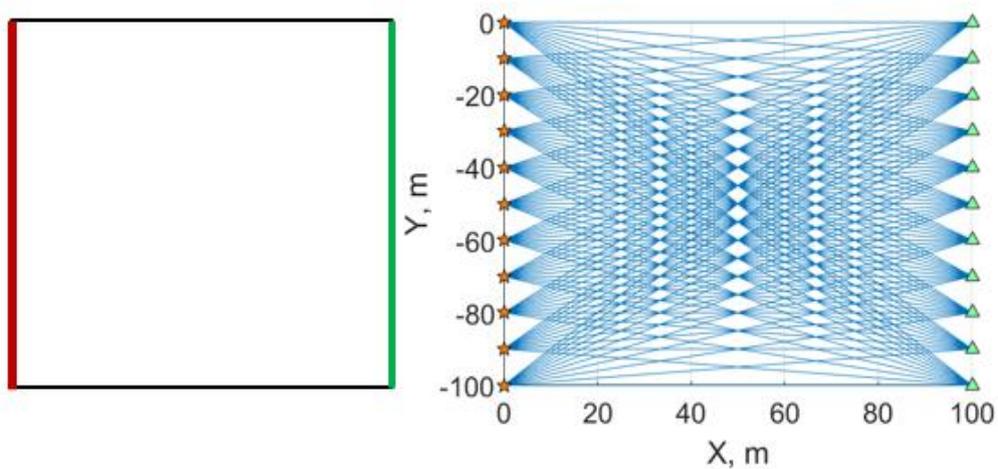


Рисунок 12. Лучевая схема (справа) и расположение источников (указаны красным цветом красные) и приемников (указаны зеленым цветом) при моделировании PR2.

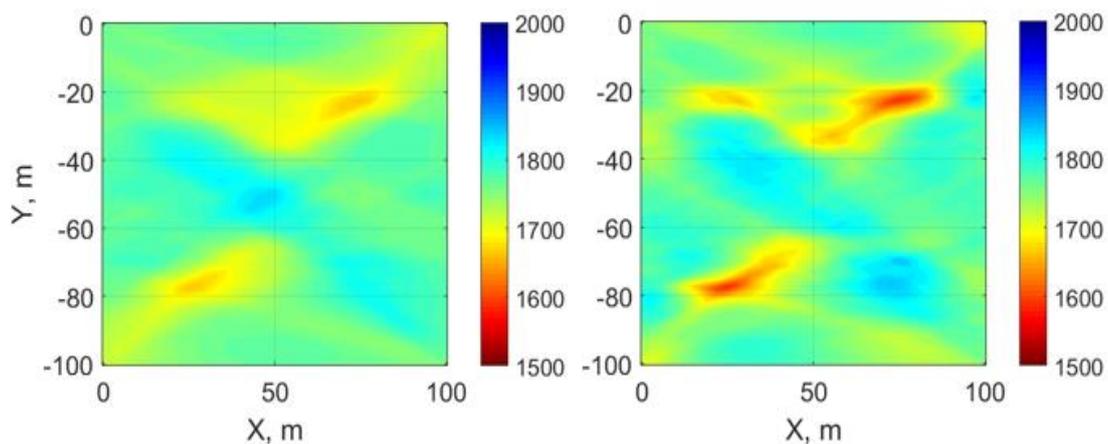


Рисунок 13. Восстановление скоростей с применением алгоритма по данным с PR2. Слева шаг между пунктами взрыва - 10 метров, пунктами приема - 10 метров, справа шаг между пунктами взрыва - 2 метра, пунктами приема - 2 метра.

Теперь перейдем к рассмотрению комбинаций профилей, чтобы оценить какой набор покажет наилучший результат. Для сравнения были выбраны комбинации, которые образует букву «Г» (Рисунок 14), букву «П» (Рисунок 16) и «квадрат» (по всему периметру) (Рисунок 18).

Сравнение полученных результатов показывает, что при расстановке «квадратом» (Рисунок 19) и расстановке буквой «П» (Рисунок 17), полученные изображения практически идентичны, следовательно, расстановка «квадрат» избыточна. Сравнение расстановок буквой «Г» (Рисунок 16) и буквой «П» показало, что расстановка буквой «П» дает более детальную картину, чем расстановка буквой «Г», за счет большего количества трасс. Однако эта разница не является существенной.

Подводя итог сравнению расстановок можно сделать вывод, что для вполне удовлетворительного результата будет достаточно расстановки буквой «Г», но при необходимости увеличения детальности получаемой картины не обязательно прибегать к расстановке «квадрат», так как буква «П» позволяет при меньших ресурсах получить схожий результат, а следовательно обеспечить достаточное количество трасс, пересекающих область.

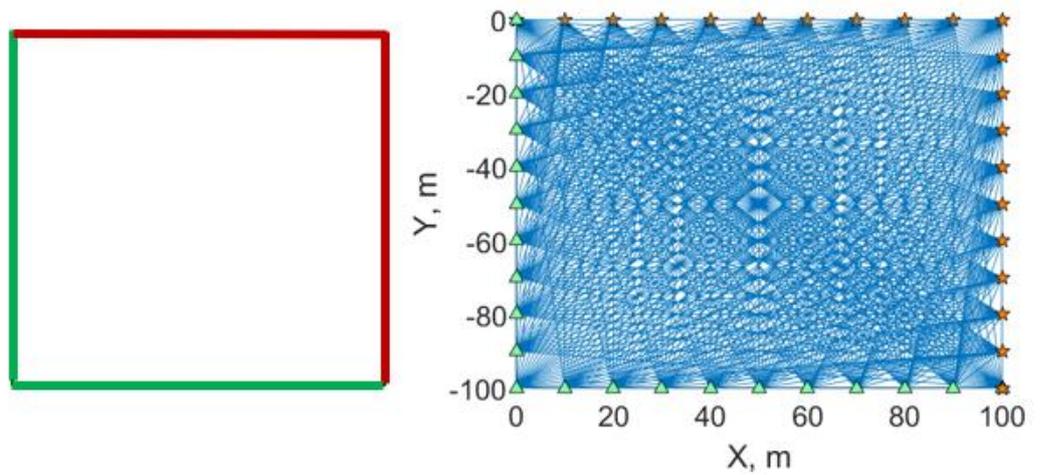


Рисунок 14 Лучевая схема (справа) и расположение источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом) при рассмотрении комбинации буква «Г».

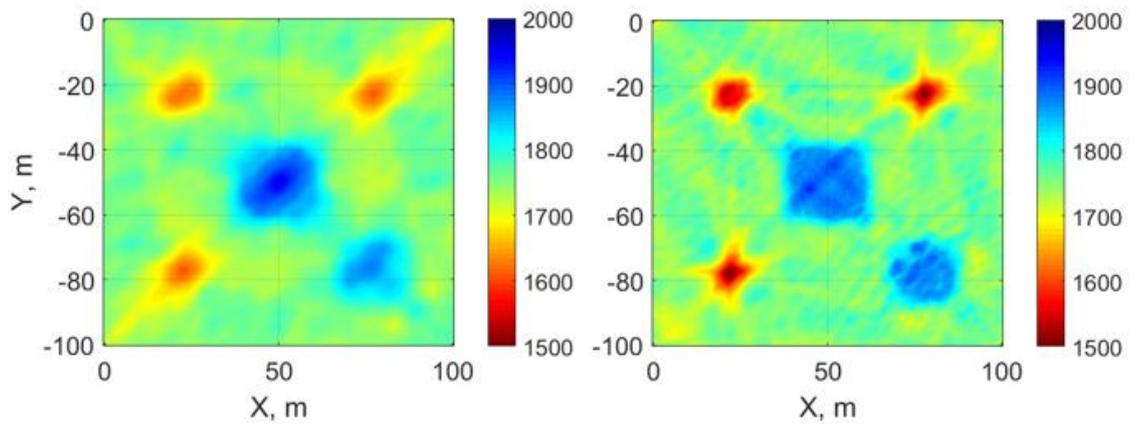


Рисунок 15. Восстановление скоростей с применением алгоритма при рассмотрении комбинации буква «Г». Слева шаг между пунктами взрыва - 10 метров, пунктами приема - 10 метров, справа шаг между пунктами взрыва - 2 метра, пунктами приема - 2 метра.

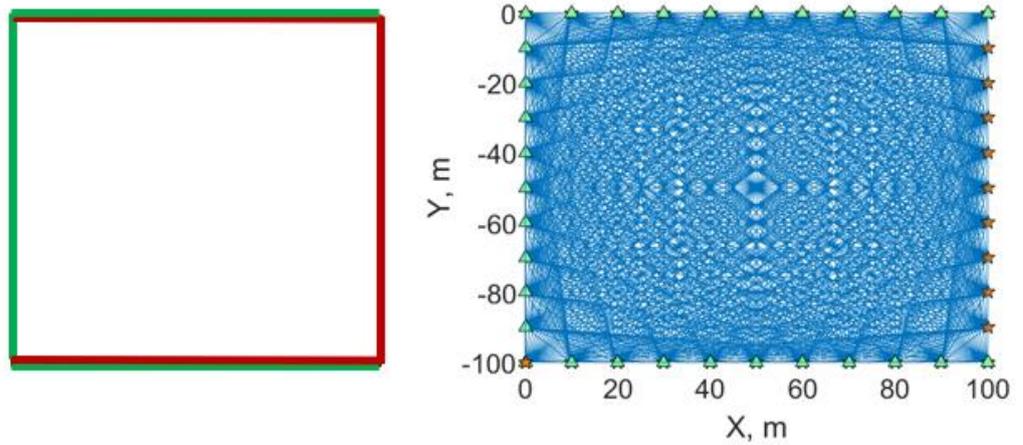


Рисунок 16. Лучевая схема (справа) и расположение источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом) при рассмотрении комбинации буква «П».

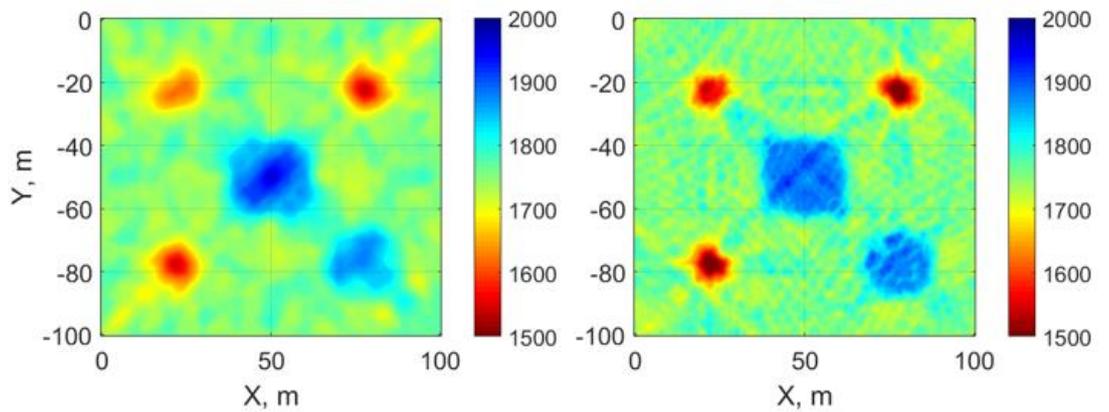


Рисунок 17. Восстановление скоростей с применением алгоритма при рассмотрении комбинации буква «П». Слева шаг между пунктами взрыва - 10 метров, пунктами приема - 10 метров, справа шаг между пунктами взрыва - 2 метра, пунктами приема - 2 метра.

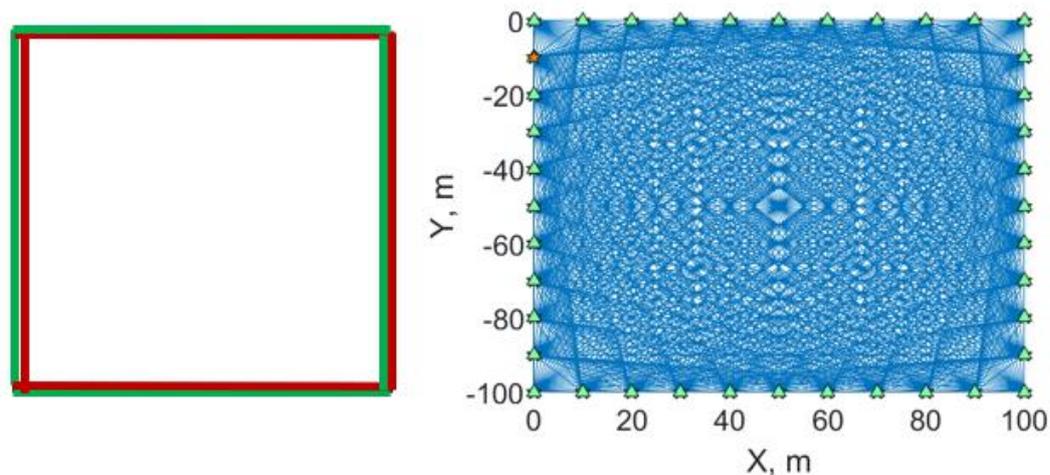


Рисунок 18. Лучевая схема (справа) и расположение источников (указаны красным цветом) и приемников (указаны зеленым цветом) при рассмотрении комбинации «квадрат».

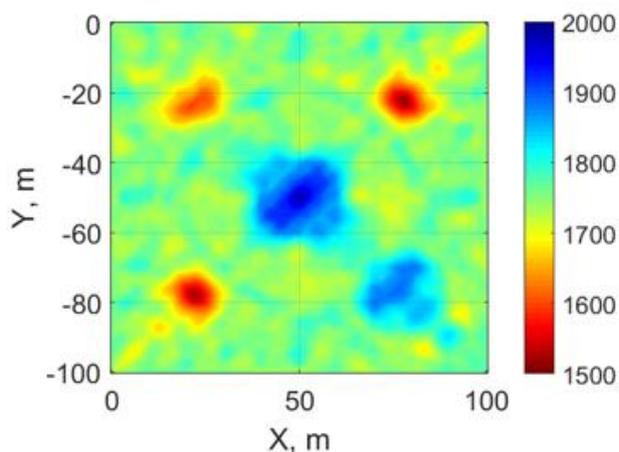


Рисунок 19. Восстановление скоростей с применением алгоритма при рассмотрении комбинации «квадрат». Шаг между пунктами взрыва - 10 метров, пунктами приема - 10 метров.

### 2.3. Параметр регуляризации

Параметр регуляризации – это один из входных параметров, необходимых для работы алгоритма поверхностно-волновой томографии (см. уравнение (6)). Величина данного параметра подбирается эмпирическим путем. При увеличении количества трасс вместе с улучшением общей картины также увеличивается количество небольших по размеру артефактов. Изменение параметра регуляризации позволяет улучшить результат восстановления, убрать артефакты.

По умолчанию, используемая реализация алгоритма поверхностно-волновой томографии по методу Дитмара-Яновской использует значение параметра равное 0.05, для сравнения протестируем алгоритм на значениях: 0.001, 0.01, 0.1, 1. Для тестирования используем времена прихода волн по лучам, полученные в программе X-Томо.

Анализ влияния изменения параметра регуляризации показывает (Рисунок 20), что при увеличении параметра общая картина размывается, контуры основных аномалий становятся менее четкими, локальные аномалии исчезают. С уменьшением параметра регуляризации происходит выделение небольших аномалий, а также артефактов, что в общем ухудшает картину. Для каждой конкретной задачи можно подобрать наиболее подходящее значение параметра.

При увеличении количества трасс (Рисунок 21), вместе с лучшим восстановлением формы и скоростных значений аномалий, происходит значительное выделение мелких аномалий-артефактов, что уменьшает возможное качество восстановления. Увеличение значения параметра позволяет улучшить результат, сглаживая мелкие аномалии-артефакты.

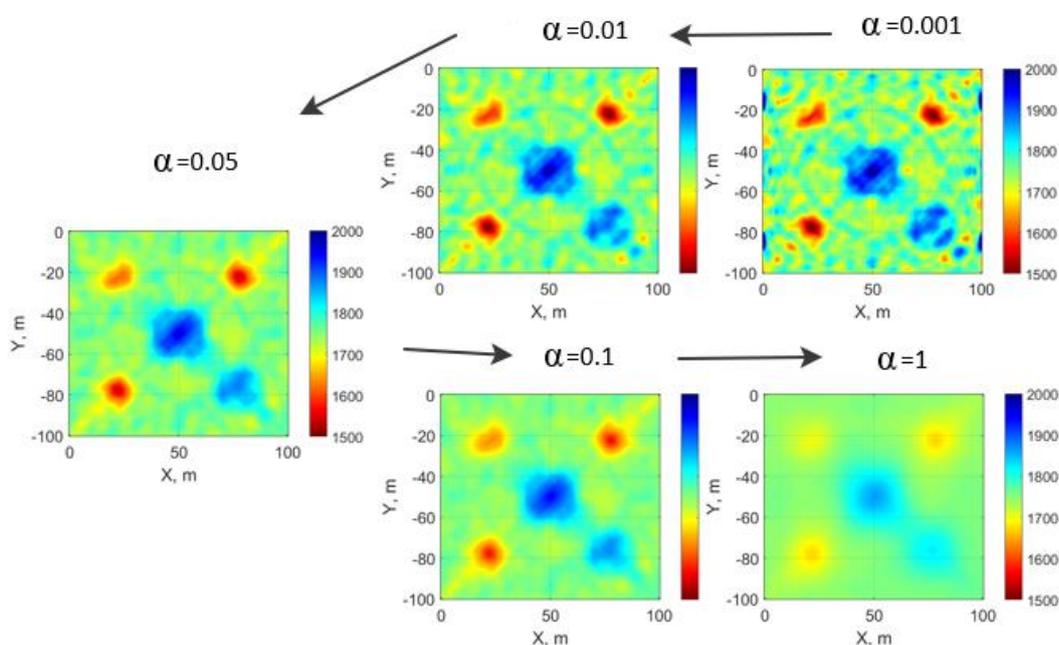


Рисунок 20. Влияние изменения параметра регуляризации на результат восстановления скорости. Шаг между пунктами взрыва - 10 метров, пунктами приема – 10 метров. Расстановка буква «П» (см. главу 2.2 Выбор системы наблюдения) Стрелкой показано уменьшение параметра регуляризации.

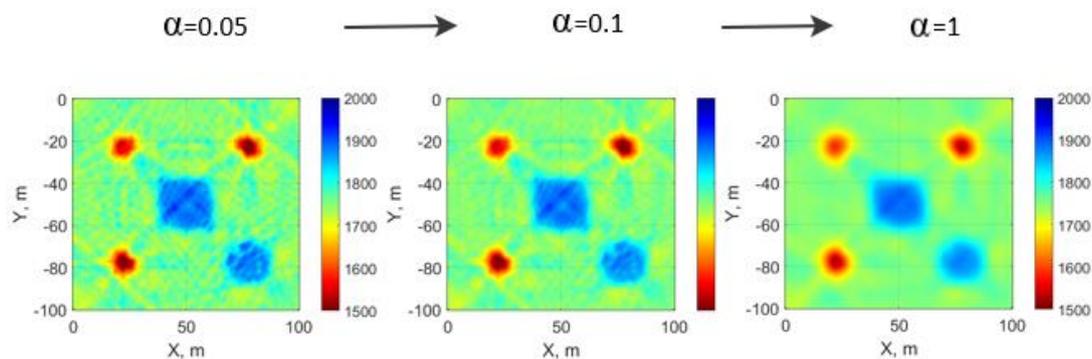


Рисунок 21. Влияние изменения параметра регуляризации на результат восстановления скорости. Шаг между пунктами взрыва - 2 метра, пунктами приема - 2 метра. Расстановка буква «П» (см. главу 2.2 Выбор системы наблюдения). Стрелкой показано увеличение параметра регуляризации.

Подводя итог тестирования влияния параметра регуляризации, можно сделать несколько выводов:

- При большом количестве трасс высокие значения параметра регуляризации позволят в целом улучшить картину;
- Параметр регуляризации можно использовать для выделения локальной составляющей при восстановлении скоростей.

#### 2.4. Разрешающая способность метода

Результатом решения томографической задачи никогда не является локальное значение скорости в конкретно заданной точке. Это всегда результат осреднения в некоторой области, в которой мелкие детали могут быть размыты, или вообще не отобразиться. Это также относится и к крупным аномалиям, которые могут быть искажены.

Разрешающая способность зависит от густоты и взаимного расположения сейсмических трасс. Один из универсальных способов проверки разрешающей способности метода — это тест шахматной доски (Яновская, 2015).

Суть теста состоит в том, что двумерная или трехмерная среда разбивается на ячейки и создается синтетическая модель, в которой каждой ячейке присваивается положительное или отрицательное значение скорости, в соответствии с последовательностью шахматной доски. Для такой синтетической модели по исходному набору трасс рассчитываются времена пробега волн. Затем с применением алгоритма, разрешающую способность которого необходимо выяснить, строится решение задачи для рассчитанных времён пробега. Результат сравнивают с исходной моделью. В том случае, если расположение положительных и отрицательных аномалий совпадает, можно сделать

вывод, что аномалии схожего с ячейками размера также будут выделяться и на реальных данных. Для того, чтобы говорить о том, какие аномалии будут отображаться, и в каких участках среды для данного набора трасс они будут проявляться, необходимо провести серию тестов с разным размером ячеек. Достоинство этого подхода в том, что он позволяет надежно оценить разрешающую способность метода (Яновская, 2015).

Пример применения теста шахматной доски можно посмотреть на Рисунок 22. В верхней части представлена исследуемая среда. В средней части представлены модели шахматной доски с разным размером ячеек (первая 20x20 м, вторая 10x10 м, третья 5x5 м). В нижней части результат восстановления методом Дитмар-Яновской. Анализ теста показывает, что в первом случае проявляются все неоднородности, хоть и с разной точностью. Во втором случае общая картина прослеживается, но форма аномалий искажается. В третьем случае даже общая картина оказывается сильно искажена. В результате можно сделать вывод, что для данной выборки трасс могут быть выявлены аномалии размером до 10x10 метров. Аномалии меньшего размера выделяться не будут. (Яновская, 2015)

Подобный шахматный тест был проведен для тестируемого алгоритма поверхностно-волновой томографии. Была выбрана модель, представляющая из себя квадрат со сторонами 50 метров. Для моделирования была выбрана расстановка буквой «П», которая позволяет получить наилучший конечный результат, с наименьшими ресурсами. Для тестирования были выбраны следующие модели шахматной доски: 10x10, 5x5, 4x4, 2x2 (Рисунок 24). Для того чтобы приблизительно оценить влияние количества трасс на разрешающую способность тестирование проводилось для двух расстановок: в первом случае шаг между источниками и приемниками равен 2 метра, во втором случае шаг между источниками и приемниками равен 4 метра (Рисунок 23).

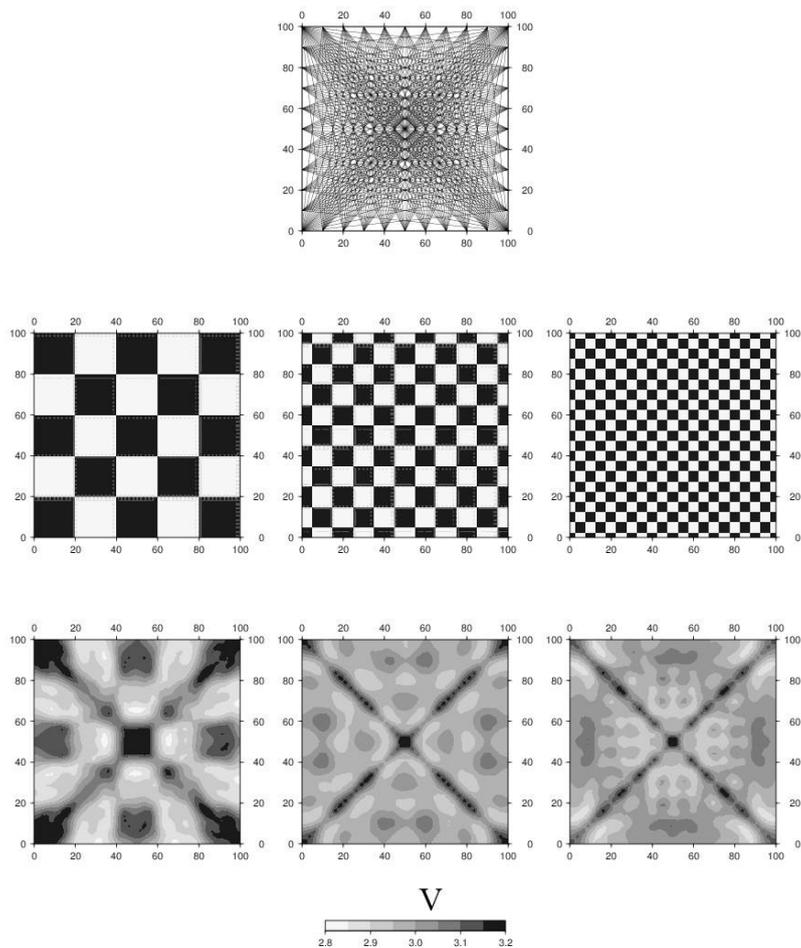


Рисунок 22. Пример теста «шахматной доски». Вверху – схема трасс, по которым рассчитывались времена пробега в синтетических моделях, показанных ниже. Под каждой из моделей показано решение, полученное методом Дитмара-Яновской (Яновская, 2015).

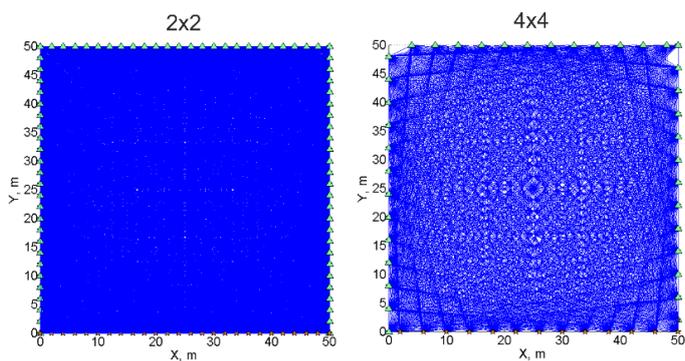


Рисунок 23. Схемы трасс, по которым рассчитывались времена пробега для шахматного теста. Слева показана схема для шага между ПП=ПВ=2 метра, справа для шага между ПП=ПВ=4 метра.

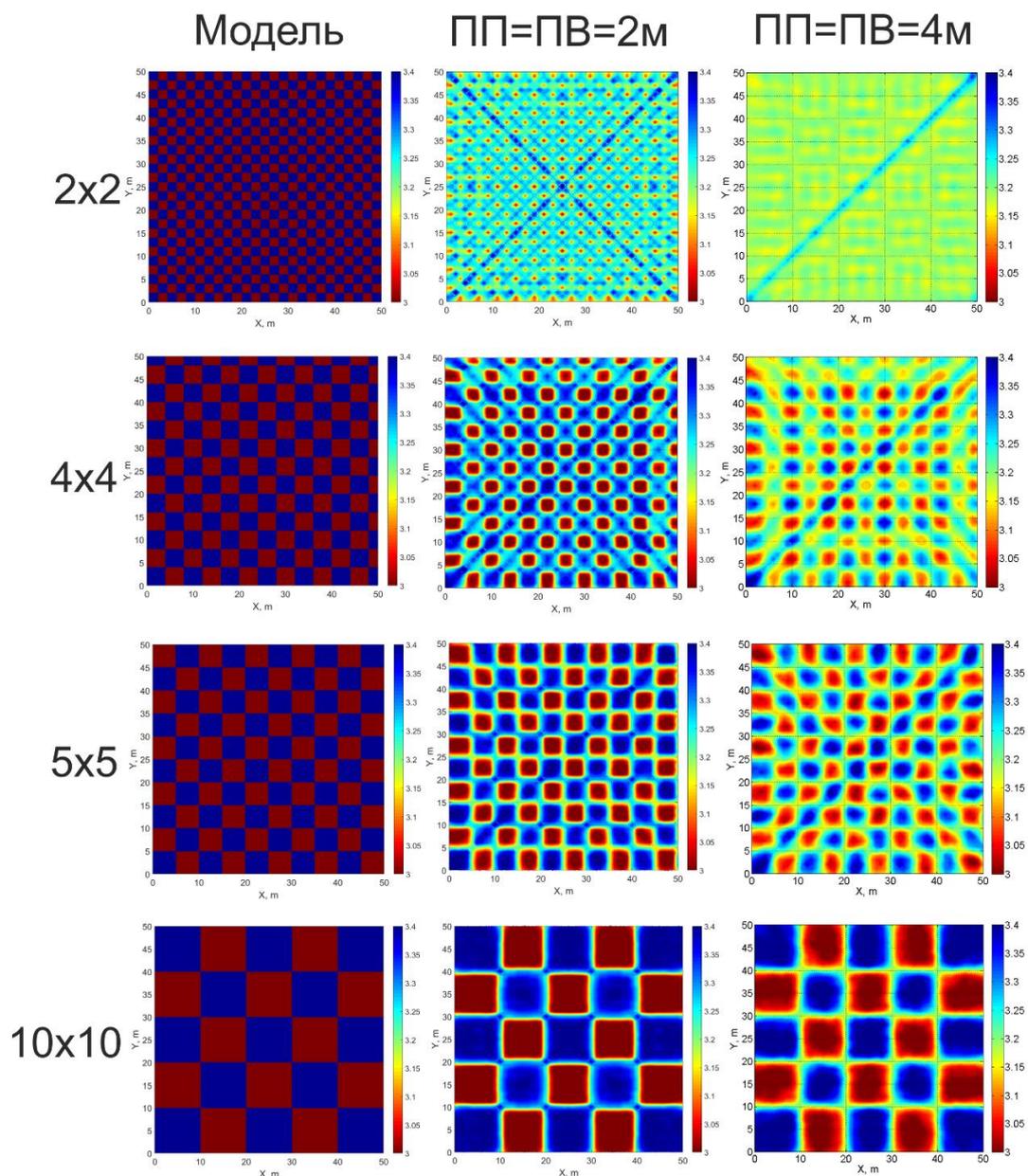


Рисунок 24. Шахматный тест для поверхностно-волновой томографии. Размер модели 50x50 метров, Расстановка буквой «П». Справа от каждой модели показано решение методом поверхностно-волновой томографии для двух наборов трасс.

Качественный анализ результатов шахматного теста (Рисунок 24) для расстановки 4x4 показывает, что аномалии с размером 10 метров восстанавливаются хорошо, 5 метровые аномалии также выделяются, но форма начинает искажаться, 4 метровые аномалии уже сильно искажены, а 2 метровые аномалии выделить крайне трудно, так как наблюдаются только размытые очертания.

Расстановка 2x2 без искажений восстанавливает форму 10 и 5 метровых аномалий, 4 метровые высокоскоростные аномалии также восстанавливаются без искажений, а низкоскоростные немного теряют форму. Для 2 метровых аномалий в целом можно

проследить основную закономерность в восстановлении скоростей аномалий, но границы получаются сильно размытыми.

В итоге можно сделать вывод, что расстановка 4x4 уверенно восстановит аномалии размером до 5x5 метров, расстановка 2x2 уверенно восстанавливает аномалии размером до 2x2 метра (результат согласуется с результатом из книги Яновская, 2015, представленным на Рисунок 22). Разрешающая способность метода напрямую связана с количеством трасс, покрывающих исследуемую область, и можно заметить, что чем чаще шаг между ПП и ПВ, тем больше трасс, тем выше детальность. В этом заключается одно из отличий от метода MASW, в котором разрешающая способность ограничена длиной приемной расстановки. Следует отметить, что речь идет именно о разрешающей способности и возможностях алгоритма, так как существуют принципиальные физические ограничения, определяющиеся длиной волны (и для метода MASW и для поверхностно-волновой томографии).

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Проверка работоспособности алгоритма на синтетических данных, полученных в программных пакетах Tesserai и X-Tomo, показала, что метод поверхностно-волновой томографии (его реализация по методу Дитмара-Яновской на языке MATLAB) работает корректно. Для дальнейшей проверки было принято решение провести эксперимент в реальных условиях.

Местом проведения испытания был выбран пляж на берегу Финского залива в черте города Сестрорецк (Рисунок 26). По имеющимся априорным данным (карты времен Финской и Великой отечественной войны) в исследуемой области располагалась долговременная огневая точка (ДОТ), предполагаемое местоположение которой заверено с помощью магнитометра (наблюдалась ощутимая магнитная аномалия). Также рядом с ДОТом проходило одно из бывших устьев русла реки Сестры (Рисунок 25). На данный момент сооружение ДОТа, как и бывшее русло, погребены под песком.

После анализа априорных данных в области исследования ожидалось наличие высокоскоростной аномалии в районе расположения железобетонной конструкции ДОТа и областей с пониженной скоростью в районе бывшего русла из-за разницы в увлажнении песка. Был поставлен вопрос, получится ли с помощью поверхностно-волновой томографии выявить эти аномалии?

Область проведения эксперимента можно представить в виде прямоугольника со сторонами 38 (OY) и 46 (OX) метров. Формальное начало координат было сдвинуто на 46 метров, и теперь имеет координаты (0; 46). Координаты предполагаемого местоположения ДОТа (10 (+-3); 80 (+-3)). При проведении эксперимента источники и приемники располагались по периметру области согласно Рисунок 27, шаг между источниками и шаг между приемниками был равен 2 метра, так как разрешающая способность такой расстановки должна уверенно выделить искомый объект.

Приемной линией являлась 24-канальная сейсмическая коса, приемники (геофоны) были углублены в песок. Для регистрации и оцифровки сигналов использовалась инженерная сейсмостанция «Лакколит». Источником колебаний была кувалда весом 5 кг, удары наносились по сосновому чурбану, с пятикратным накоплением. Чурбан переносился вдоль профиля возбуждения колебаний.



Рисунок 25. Спутниковый снимок и схематичное изображение места исследования с обозначенным примерным местоположением ДОТа и бывшего русла, а также координатных осей и условного начала координат.



Рисунок 26. Фотография оборудования и места проведения эксперимента.

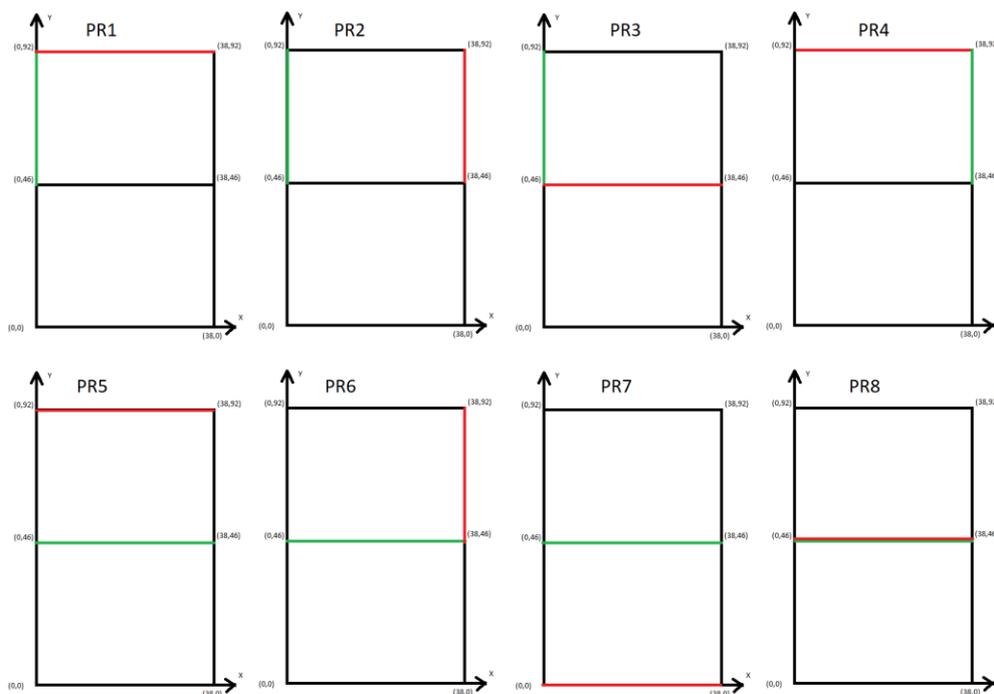


Рисунок 27. Графическое изображение расстановок на базе которых проводился эксперимент. Цветом показано взаимное расположение источников (красный цвет) и приёмников (зеленый цвет).

Обработка результатов проводилась в программе RadExPro с использованием алгоритма для поверхностно-волновой томографии, реализованного в MATLAB.

Процесс обработки полученных сейсмограмм продемонстрирован на Рисунок 28 и Рисунок 29. Граф обработки состоял из следующей последовательности операций: 1. выделение области предполагаемого сигнала (поверхностной волны Рэлея) с применением процедуры мьютинга; 2. применение узкополосного фильтра (был выбран диапазон исследуемых частот от 20 до 50 Гц в соответствии с частотным составом сигнала и предполагаемой глубиной исследования); 3. построение модуля аналитического сигнала («Reflection Strength»); 4. пикирование максимумов модуля аналитического сигнала, положение которых соответствует времени прихода поверхностной волны (с групповой скоростью).

На Рисунок 28 приведен пример некачественной сейсмограммы, пикирование которой не дает необходимого количества точек. Тем не менее качество большинства сейсмограмм (Рисунок 29) оказалось удовлетворительным и позволяет обеспечить достаточное количество пикировок несмотря на то, что пришлось исключить из обработки профили 1 и 2 из-за некачественных данных.

Итоговый результат – площадные распределения групповой скорости поверхностной волны Рэлея для всего диапазона частот с шагом в 10 Гц, представлен на Рисунок 30. На всех рассмотренных частотах, непосредственно в районе расположения

предполагаемого объекта, как и ожидалось, наблюдается высокоскоростная аномалия. Также в районе предполагаемого русла (начиная от правого верхнего угла с координатами (38; 92)), наблюдаются области пониженных скоростей. Кроме того, результаты позволяют проследить характер изменения аномалий с частотой, а следовательно, и с глубиной. Можно заметить, что с увеличением глубины проникновения волн (уменьшением частоты) интенсивность аномалии растет.

Таким образом успешное функционирование метода поверхностно-волновой томографии Дитмара-Яновской и его программной реализации на языке MATLAB было показано как на модельных, так и на реальных данных. Следовательно его можно применять для решения инженерно-геофизических задач.

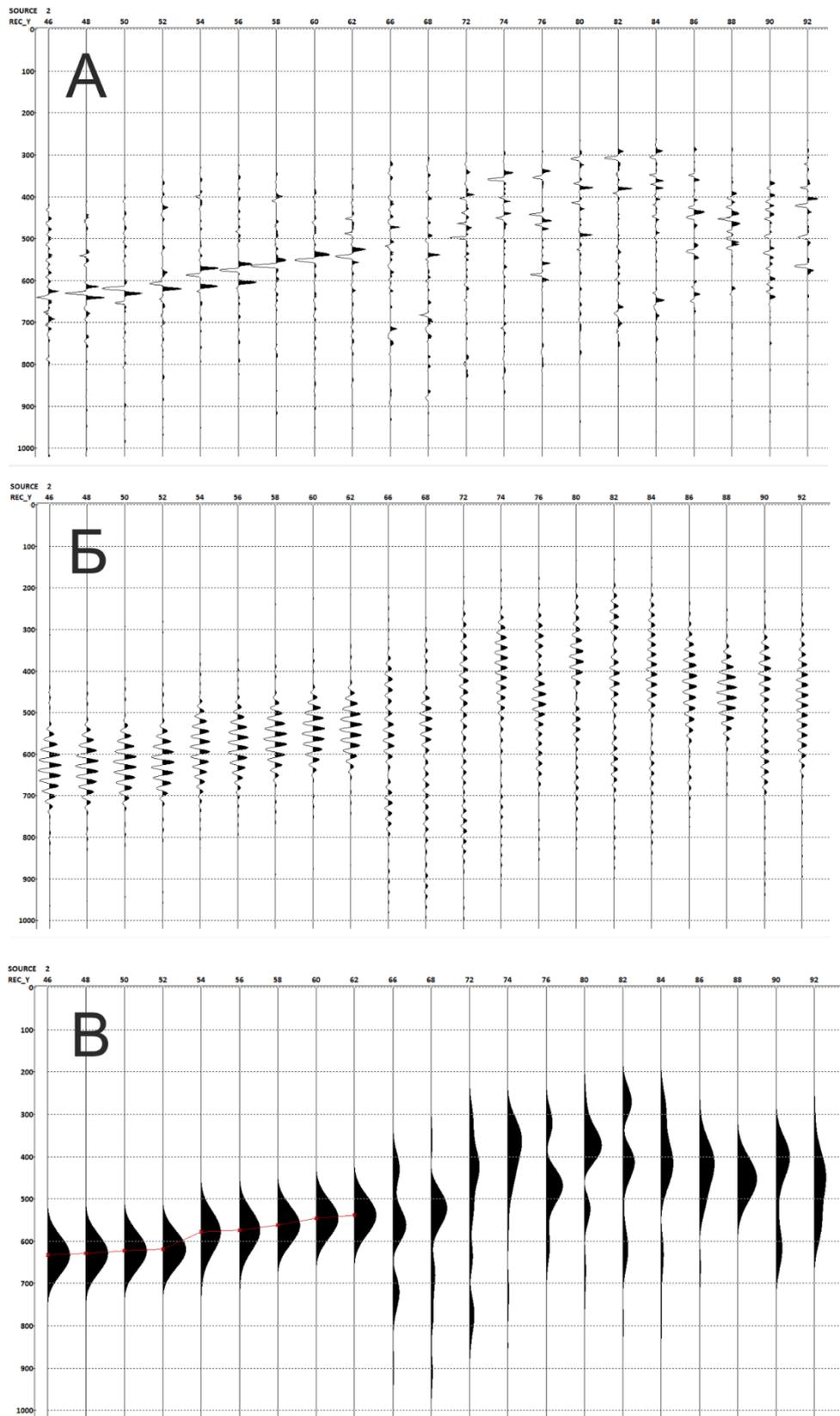


Рисунок 28. Примеры обработки трасс сейсмограмм (2 профиль, 2 ПВ) для пикирования времён прихода поверхностной волны. А – исходная сейсмограмма, Б – после мьютинга и фильтра, В – аналитический сигнал с пикированными значениями (показаны красным цветом).

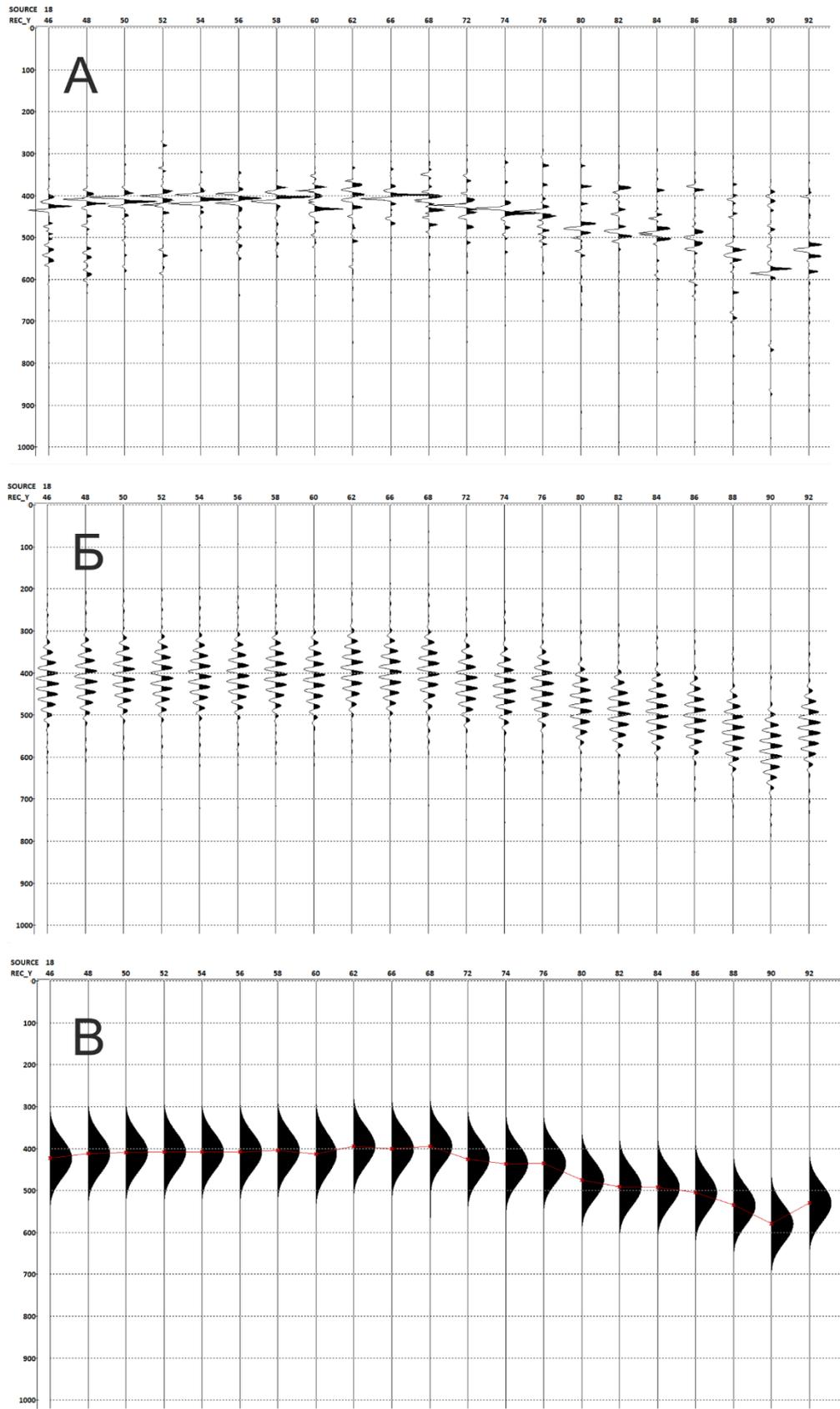


Рисунок 29. Примеры обработки трасс сейсмограмм (2 профиль, 18 ПВ) для пикирования времён прихода поверхностной волны. А – исходная сейсмограмма, Б – после мьютинга и фильтра, В – аналитический сигнал с пикированными значениями (показаны красным цветом).

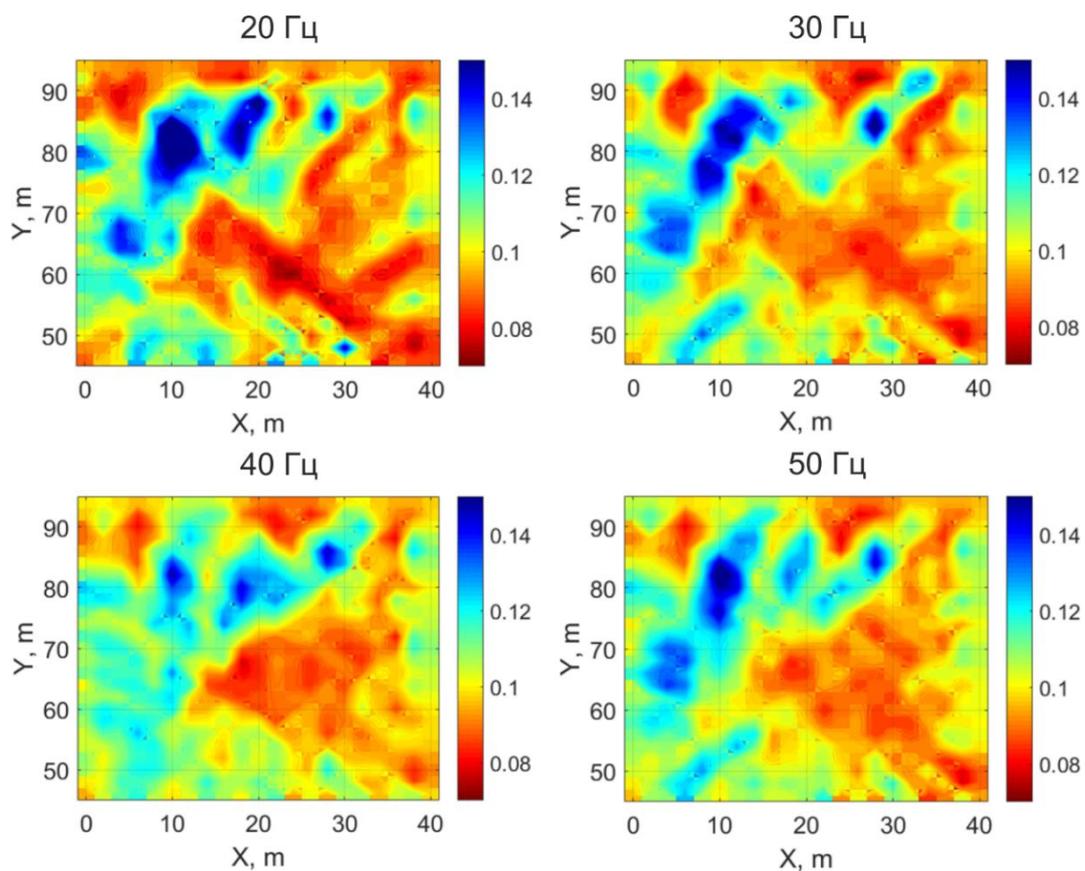


Рисунок 30. Итоговый результат томографии для различных частот (20-50 Гц) с выявленными высокоскоростными аномалиями в районе предполагаемого залегания ДОТа, а также низкоскоростной зоной в районе бывшего русла реки. Скорости поверхностной волны указаны в км/с. Фиксированная палитра от 0.07 до 0.15 км/с.

## ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы было показано для метода поверхностно-волновой томографии:

- Приближение о прямолинейности лучей не очень существенно влияет на результат восстановления скорости;
- Параметр регуляризации позволяет контролировать контрастность аномалий, что можно использовать для выделения как локальной составляющей, так и крупных аномалий;
- Оптимальная система наблюдений для площадных исследований — это система наблюдений типа «П» или «Г» в зависимости от бюджета исследования;
- Разрешающая способность напрямую зависит от количества трасс. В отличие от метода MASW, не зависит от размеров расстановки. Для повышения разрешающей способности метода рекомендуется увеличивать количество лучей за счет уменьшения шага между пунктами приема и пунктами взрыва;

Кроме того, был получен практический результат по реальным данным:

- В ходе эксперимента было установлено предположительное место захоронение ДОТа, о чем свидетельствует наличие высокоскоростных аномалий групповой скорости поверхностной волны Рэлея в пределах исследуемой области. Результаты эксперимента и полученное распределение аномалий соответствует представлениям о строении верхней части разреза исследуемой области.

В сравнении с методом MASW, метод поверхностно-волновой томографии дает возможность получать более качественные данные за счет лучшей разрешающей способностью, также возможно получение 3D модели среды меньшими трудозатратами, кроме того можно удаленно изучать объекты, так как не требуется выполнять исследования непосредственно над объектами — источники и приемники расставляются по периметру области.

Проделанная работа позволяет полагать, что метод поверхностно-волновой томографии в целом и алгоритм Дитмара-Яновской в частности (включая его программную реализацию на языке MATLAB), можно эффективно использовать для изучения верхней части разреза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 2006. 744 с.
2. Бондарь В.И. Основы Сейсморазведки. Екатеринбург: Издательство УГГА, 2003. 332 с.
3. Воскресенский Ю.Н. Полевая геофизика: Учебник для вузов. Москва: ООО «Издательский дом Недра», 2010. 479 с.
4. Яновская Т.Б. Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб: Наука, 2015. 187 с.
5. Alyousuf T. и др. Surface-wave tomography to resolve water table: Almond Orchard case study, Modesto, California. , 2017. С. 5407–5411.
6. Bohlen T. и др. 1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion // Geophysics. 2004. Т. 69. № 2. С. 330–344.
7. Boiero D., Wiarda E., Vermeer P. Surface-and guided-wave inversion for near-surface modeling in land and shallow marine seismic data // Lead. Edge. 2013. Т. 32. № 6. С. 638–646.
8. Ikeda T., Tsuji T. Surface-wave tomography for near-surface characterization with continuous wavelet transform for two-station cross-correlation // 2018 SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG 2018. , 2018. С. 2531–2535.
9. Klein G. и др. Acquisition and inversion of dispersive seismic waves in shallow marine environments // Mar. Geophys. Res. 2005. Т. 26. № 2–4. С. 287–315.
10. Kugler S. и др. Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments // Geophys. J. Int. 2007. Т. 168. № 2. С. 551–570.
11. Long L.T., Kocaoglu A.H. Surface-Wave Group-Velocity Tomography for Shallow Structures // J. Environ. Eng. Geophys. 2001. Т. 6. № 2. С. 71–81.
12. Rector J.W. и др. Tomographic imaging of surface waves: A case study from the Phoenix Mine, Battle Mountain, Nevada // Lead. Edge. 2015. Т. 34. № 11. С. 1360–1364.
13. Yanovskaya T.B., Ditmar P.G. Smoothness criteria in surface wave tomography // Geophys. J. Int. 1990. Т. 102. № 1. С. 63–72.