

Санкт-Петербургский государственный университет

ЛЕВИН Илья Сергеевич

Выпускная квалификационная работа

*Применение поверхностно-волновой томографии для изучения верхней части разреза
в условиях газонасыщенных грунтов в акватории Обской губы*

Магистратура:

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5796.2020 «Геофизика»

Научный руководитель:

к.г.-м.н., доцент,

Вячеслав Владимирович Половков

Рецензент:

начальник отдела полевых работ,

ООО «СПЛИТ»,

Потемка Андрей Константинович

Санкт-Петербург

2022

Содержание:

Введение.....	3
1 Обзор методов анализа поверхностных волн	5
1.1 Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW)	8
1.2 Поверхностно-волновая томография (SWT)	10
1.3 Примеры применение методов MASW и SWT	14
2 Инженерно-геофизические исследования на акватории Обской губы	17
2.1 Местоположение и геологическое строение участка работ.....	17
2.2 Методика и технология проведения сейсмических исследований	18
2.3 Анализ волнового поля.....	22
2.4 Обработка данных по методу MASW	25
2.5 Обработка данных по методу SWT	27
3 Анализ результатов обработки.....	33
3.1 Результаты обработки по методу MASW	33
3.2 Результаты обработки по методу SWT	35
3.3 Оптимизация системы наблюдений для площадных исследований	36
3.4 Методические рекомендации по проведению работ на акваториях на поверхностных волнах	41
Выводы	43
Список литературы:	45
Приложение А. Тестирование влияние фильтрации на аналитический сигнал.	49
Приложение Б. Оптимизация системы наблюдений для площадных исследований.	52

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.

Особый интерес представляют инженерные работы на акваториях, так как в наше время активно идет освоение шельфовой зоны морей. При проведении работ для обнаружения и прогнозирования развития опасных геологических процессов, поиска локальных объектов или уточнения геологического разреза традиционно применяют сейсморазведку высокого разрешения в различных модификациях (НСАП, ССВР), при таких работах используются сейсмические косы и электроискровые источники, обеспечивающие высокочастотный сигнал. Эти методы позволяют уверенно расчлнить разрез и обнаружить потенциально опасные зоны. Но при сплошной загазованности осадков, высокочастотные сигналы затухают и рассеиваются, осадки становятся «акустически прозрачными» (рисунок 1.1.1). Кроме того, методики из «большой» сейсморазведки также малоэффективны при работе в транзитной зоне.

Актуальность работы заключается в том, что изучение верхней части разреза при наличии газа в осадках, малоэффективно при использовании традиционных подходов. В таком случае для исследования внутреннего строения можно использовать методы, основанные на анализе поверхностных волн, зарегистрированных с использованием донного оборудования и пневмоисточников малого объема для получения низкочастотного сигнала.

Цель работы: оценить эффективность и целесообразность применения поверхностно-волновой томографии для изучения верхней части разреза на акваториях в сравнении с методом MASW

Задачи работы:

- Изучить литературу по теме исследования;
- Обработать данные методами поверхностно-волновой томографии (SWT) и MASW, полученные при проведении инженерно-геофизических исследований в Обской губе;
- Проанализировать полученные результаты и сделать вывод об эффективности поверхностно-волновой томографии (SWT);

1 ОБЗОР МЕТОДОВ АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Поверхностные волны – упругие волны, распространяющиеся вдоль поверхности твёрдого тела или вдоль границы с другими 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 et al., 2004; Boiero, Wiarda, Vermeer, 2013; Klein et al., 2005; Kugler et al., 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 ее 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, λ_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 (а значит 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

Рэля распространяется вдоль свободной поверхности полупространства со скоростью $V_R \approx 0,9V_S$. Волна Рэля, образуемая на свободной границе абсолютно упругого однородного полупространства, не имеет частотной дисперсии, то есть её скорость в однородной среде не зависит от частоты колебаний (Воскресенский, 2010).

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 Рэля 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 Рэля и траектории колебаний частиц от глубины (Рисунок 1.2.1) 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).

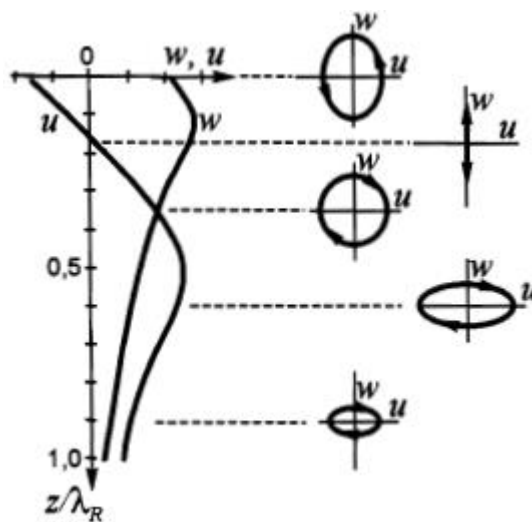


Рисунок 1.2.1. Зависимость компонент смещения и траектории колебания частиц от глубины для поверхностной волны Рэля (Воскресенский, 2010).

С удалением от источника колебаний интенсивность поверхностной волны Рэля относительно интенсивности объемных волн возрастает. Это связано с особенностью распространения волны Рэля в трехмерном пространстве, оно происходит в объеме

цилиндрического слоя кругового сечения высотой h (Рисунок 1.2.2). Высота цилиндра h определяется мощностью слоя, в котором происходит распространение колебаний ($h \sim \lambda_R$). При длительности колебаний δt 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).

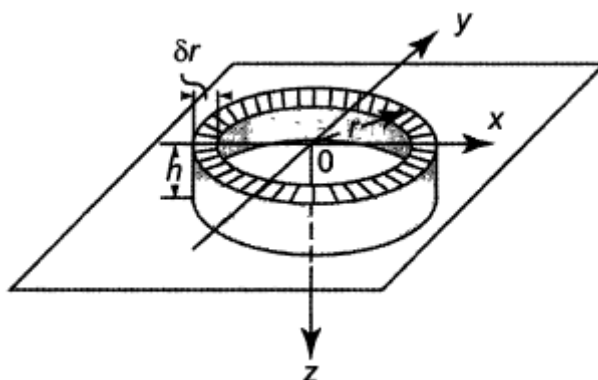


Рисунок 1.2.2 Распространение волны Рэлея в объеме цилиндрического слоя (Боганик, Гурвич, 2006).

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 скорости 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.

1.1 Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW)

Метод многоканального анализа поверхностных волн заключается в оценке скорости распространения поперечных волн в среде, на основе анализа распространения скорости поверхностных волн (Park et al., 1999).

Преимуществом метода MASW является простая методика сбора полевых данных, без проблем позволяющая получить высокое соотношение сигнал/шум. Так как при возбуждении колебаний большая часть энергии (>60%) уходит на создание поверхностных волн, кроме того, они распространяются на большие расстояния без сильных потерь энергии. В сравнении с объемными волнами, для которых достичь приемлемого соотношения сигнал/шум крайне тяжело как на этапе сбора полевых данных, так и на этапе обработки (Park et al., 1999).

Результатом исследований методом MASW, является 1D изменение скорости поперечных волн. За счет перемещения расстановок с определенным шагом вдоль профиля, можно получить 2D разрез. Также можно перейти к 3D измерениям, за счет интерполяции данных между несколькими профилями. В общей процедуре анализа поверхностных волн можно выделить 3 этапа: Первый – сбор полевых данных, используются фланговые расстановки, результат инверсии относится к центру такой расстановки, второй – анализ данных, который заключается в подготовке данных и последующего анализа и извлечения дисперсионной кривой из каждой полевой записи, третий – инверсия данных, за счет нахождения такой теоретической дисперсионной кривой, которая наилучшим образом описывает измеренную (Park и др., 1999).

Сбор полевых данных должен обеспечивать получения фланговых сейсмограмм (рисунок 1.3.1).

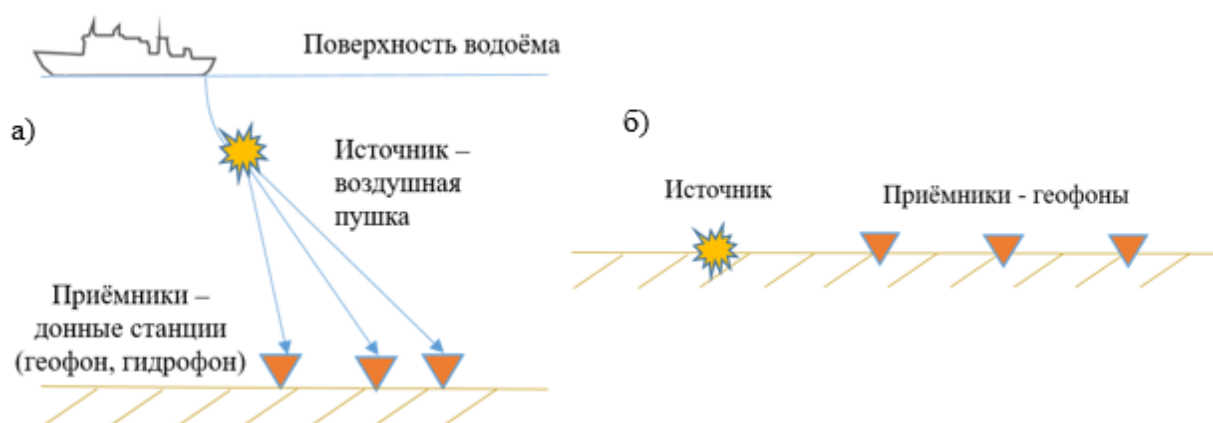


Рисунок 1.3.1 Схема проведения наблюдений методом MASW, (а) – при морских исследованиях, (б) – при наземных исследованиях (Ponomarenko et al., 2019).

Для получения дисперсионного изображения используется фланговая сейсмограмма, из которой получают дисперсионное изображения используя метод сдвига фаз. Суть метода заключается в том, что, используя быстрое преобразование Фурье, выделяем отдельную частотную составляющую и применяем нормализацию к каждой компоненте (1) (Park et al., 1999):

$$r_i \xrightarrow{\text{БПФ}} R_i(\omega) \xrightarrow[\text{Амплитуд}]{\text{Нормализация}} R_{i,norm}(\omega) = \frac{R_{i,norm}}{|R_{i,norm}|} (\omega = 2\pi f), \quad (1)$$

Затем, перебирая для конкретной фазовой скорости из некоторого диапазона, вычисляют величину фазового сдвига на конкретной частоте, вводят статическую поправку и суммируют, чтобы получить значение энергии для набора фазовых скоростей на конкретной частоте (2) (Park и др., 1999):

$$A_S(C_T) = e^{-j\delta_{1,T}} R_{1,norm}(\omega) + e^{-j\delta_{2,T}} R_{2,norm}(\omega) + \dots + e^{-j\delta_{N,T}} R_{N,norm}(\omega), \quad (2)$$

где $\delta_{i,T} = \omega \left[\frac{x_1 + (i-1)dx}{C_T} \right]$, C_T – фазовая скорость, $A_S(C_T)$ – значение суммарной энергии для фазовой скорости (Park et al., 1999).

Данная процедура повторяется для разных частотных составляющих. Результатом является дисперсионное изображение, на котором максимуму энергии будет отвечать наиболее характерная фазовая скорость. Считывая значения фазовой скорости для каждой частоты, получаем «измеренную» кривую, которая в дальнейшем используется для инверсии. Если в исходных данных присутствует мультимодальная дисперсия, то на одной частоте будет наблюдаться несколько максимумов (Park et al., 1999).

1.2 Поверхностно-волновая томография (SWT)

Метод сейсмической томографии заключается в оценке распределения фазовых или групповых скоростей сейсмических волн в среде по конечному числу данных о временах пробега волн по разным трассам, пересекающим область исследования (рисунок 1.4.1) (Левин и др., 2022). 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 горизонтальных направлениях, поэтому их скорости можно определить из двумерной томографии, тогда как для объёмных волн необходимо использовать трехмерную томографию (Яновская, 2015).

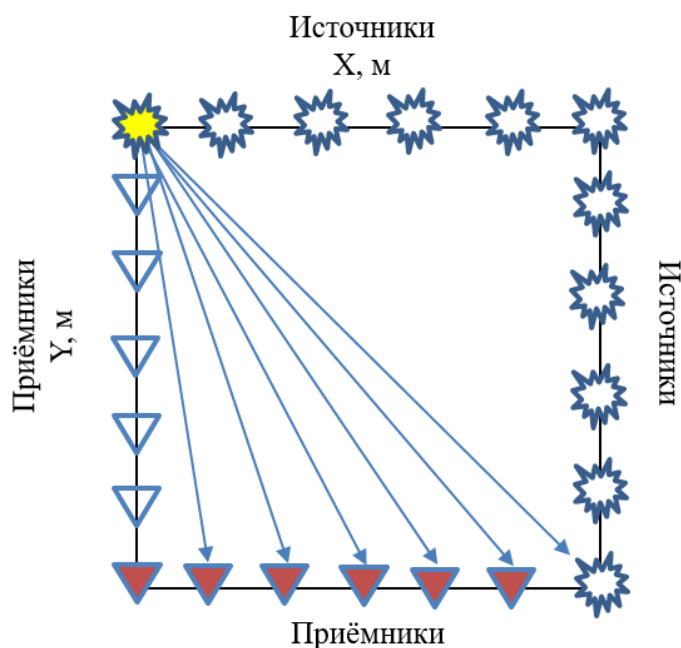


Рисунок 1.4.1 Схема расположения источников и приёмников, а также лучевых трасс в SWT (Ponomarenko et al., 2019)

Метод поверхностно-волновой томографии позволяет восстанавливать 3D модели среды по данным поверхностных волн, при этом задача определения скоростного строения трёхмерной среды может быть разделена на две части. Первая — двумерная томография скоростей поверхностных волн для набора частот (или периодов), вторая — одномерная обратная задача восстановления локальных вертикальных скоростных разрезов для каждой точки на поверхности среды. 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 и последующего обращения дисперсионных кривых. Такое разделение возможно в предположении о слабых горизонтальных вариациях скоростных параметров исследуемой среды (горизонтальные вариации должны быть малы на расстоянии порядка длины волны).

В таких средах характеристики поверхностной волны (в первую очередь фазовая и групповая скорости) определяются локально для каждой точки поверхности как в горизонтально-однородной среде. Данное допущение позволяет считать трассы, по которым распространяются поверхностные волны, прямыми линиями. Для начального приближения допустимо принимать постоянные значения скорости поверхностной волны для каждой частоты (каждого периода) (Левин и др., 2022).

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 (Левин и др., 2022).

Метод Дитмара-Яновской заключается в том, что в качестве априорного условия на поведение скорости принимается условие её гладкости, а также постоянство значения искомой поправки к скорости на бесконечности (см. ниже). 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 получить решение аналитически. Поэтому программная реализация данного метода не требует численных решений для построения 2D горизонтального распределения скорости поверхностных волн, что непосредственно оптимизирует время решения задачи. Кроме того, в отличие от других реализаций поверхностно-волновой томографии (например, метода Тарантола), не требуется априорного задания радиуса корреляции неоднородностей (Яновская, 2015), что позволяет уменьшить количество параметров (Левин и др., 2022).

Задача сейсмической томографии, основанная на данных о временах пробега волны t_i по разным трассам (лучам) L_i , пересекающих исследуемую область, формулируется как поиск функции распределения скорости $V(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} \in (2D, 3D)$) следующим образом:

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

При такой постановке задача является нелинейной, так как трасса L_i зависит от неизвестного распределения скорости. Но в предположении о том, что искомое распределение скорости мало отличается от некоторого заданного начального приближения $V_0(\mathbf{r})$ (математически это условие может быть записано в виде $(V(\mathbf{r}) - V_0(\mathbf{r}))/V_0(\mathbf{r}) \ll 1$), разность между наблюдаемым временем пробега и вычисленным для начального распределения скорости $\delta t_i = t_i - t_{0i}$ будет линейно связана с поправкой к скорости $\delta V(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}) - V_0(\mathbf{r})$ (или с поправкой к обратной к скорости величине — медленности $\delta S(\mathbf{r}) = V^{-1}(\mathbf{r}) - V_0^{-1}(\mathbf{r})$):

$$\delta t_i = \int_{L_{0i}} \delta S(\mathbf{r}) ds, \quad (3)$$

При этом интегрирование в (3) производится вдоль трассы, соответствующей начальному распределению скорости (Левин и др., 2022).

Разобьём исследуемую область некоторой сеткой на набор ячеек, в каждой из которых будем считать искомое значение скорости постоянным. Тогда поправки к начальному приближению можно определить из линейной системы уравнений, получаемой из (1):

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

где δS_j — искомая поправка к медленности в j -ой ячейке, а A_{ij} — коэффициент, связывающий прохождение волны вдоль i -го луча в j -й ячейке. Для удобства вместо размерных величин, которыми являются поправки к медленности, можно перейти к безразмерным, а именно относительным поправкам к медленности $m_j = V_{0j} \delta S_j$. В итоге получаем уравнение:

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

где $\tau_{ij} = A_{ij}/V_{0j}$. Эти коэффициенты являются временами пробега волны вдоль i -го луча через j -ю ячейку в среде с начальным распределением скорости: $\tau_{ij} = t_{0ij} = \int_{L_{0ij}} \frac{ds}{V_{0j}}$. В качестве начального приближения допустимо принимать постоянное значение скорости для всех ячеек, которое может быть рассчитано, например, как средняя скорость распространения волны по выбранным трассам в исследуемой области (Левин и др., 2022).

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

$$\Phi(\mathbf{m}) = (T\mathbf{m} - \delta\mathbf{t})^T \mathbf{R}^{-1} (T\mathbf{m} - \delta\mathbf{t}) + \alpha \Omega(\mathbf{m}). \quad (6)$$

Здесь $\delta\mathbf{t}$ — вектор с координатами δt_i , \mathbf{m} — вектор с координатами m_j , T — матрица значений τ_{ij} , $\Omega(\mathbf{m})$ — стабилизирующий функционал, который выбирается на основе априорных предположений о поведении скорости в рассматриваемой модели, \mathbf{R} — корреляционная матрица ошибок наблюдений, α — параметр регуляризации (Левин и др., 2022).

Рассмотрим представление, в котором искомая относительная поправка к медленности («модель») является функцией координат: $m(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y)$). В этом случае эту функцию можно понимать, как вектор в некотором многомерном пространстве. Запишем (5) в операторном виде через интегральное представление:

$$\delta\mathbf{t} = \mathbf{G}\mathbf{m} = \mathbf{G}(\mathbf{r})m(\mathbf{r})d\mathbf{r}, \quad (7)$$

где функции-ядра $G_i(\mathbf{r})$ отличны от нуля только на лучах (обращаются в бесконечность), и удовлетворяют следующему условию: $G_i(\mathbf{r})d\mathbf{r} = \int_{L_{0i}} \frac{ds}{V_0} = t_{0i}$ (в векторной записи

$G(\mathbf{r})d\mathbf{r} = \mathbf{t}_0$. т.е. интеграл от ядра равен времени пробега волны вдоль луча в модели среды с распределения скорости в начальном приближении. Подынтегральное выражение $G_i(\mathbf{r})d\mathbf{r}$ фактически соответствует значению τ_{ij} для некоторого j -го участка трассы, вдоль которой идёт интегрирование (Левин и др., 2022).

В методе Дитмара-Яновской в качестве априорного предположения на изменение скорости принято условие ее гладкости, стабилизирующий функционал записывается в виде $\Omega(\mathbf{m}) = |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r}$. В дополнение к этому условию вводится ещё ограничение на искомую функцию на бесконечности: $m(\mathbf{r}) = const$. Таким образом, решение задачи минимизации функционала (6) сводится к следующему:

$$\begin{aligned} (\mathbf{G}\mathbf{m} - \delta\mathbf{t})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{G}\mathbf{m} - \delta\mathbf{t}) + \alpha |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = \min \\ m = const \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим краткий вывод решения (6). Введём обозначение:

$$\Lambda = \alpha^{-1} \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{G}\mathbf{m} - \delta\mathbf{t}) \quad (9)$$

Тогда (8) запишется:

$$\begin{aligned} \Lambda^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \delta\mathbf{t}) + |\nabla m(\mathbf{r})|^2 d\mathbf{r} = \min \\ m = const \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (10)$$

Преобразуем второе слагаемое с помощью интегральной формулы Грина:

$$(\nabla m, \nabla m)d\mathbf{r} = - m(\mathbf{r}) \Delta m(\mathbf{r})d\mathbf{r} + \oint_C m \frac{\partial m}{\partial n} dl \quad (11)$$

Контурный интеграл в (11) по границе области C равен 0, т.к. $m(\mathbf{r}) = const$ на бесконечно удалённой границе области, и (10) принимает вид:

$$\begin{aligned} \Lambda^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \delta\mathbf{t}) - m(\mathbf{r})\Delta m(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \min \\ m = const \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (12)$$

Решение, удовлетворяющее (12), удовлетворяет уравнению Пуассона (это можно получить из условия равенства нулю производной от левой части выражения в (12) по $m(\mathbf{r})$, в точках минимума):

$$\Delta m(\mathbf{r}) = \Lambda^T \mathbf{G} = \sum_i \lambda_i G_i(\mathbf{r}). \quad (13)$$

Решение (13) находится через функцию Грина двумерного оператора Лапласа $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$:

$$m(\mathbf{r}) = \sum_i \lambda_i G_i(\mathbf{r}')g(\mathbf{r}, \mathbf{r}')d\mathbf{r}' + \Phi(\mathbf{r}), \quad (14)$$

где $\Phi(\mathbf{r})$ — произвольная гармоническая функция (удовлетворяющая уравнению Лапласа). Эта функция может быть только постоянной величиной, т.к. искомое решение должно быть постоянно при $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$ (как следствие одной из теорем о гармонических функциях — её максимальное значение должно быть на границе области). Искомое решение принимает вид:

$$m(\mathbf{r}) = \sum_i \lambda_i \psi_i(\mathbf{r}) + C = \boldsymbol{\psi}^T \boldsymbol{\Lambda} + C, \quad (15)$$

где базисная функция $\psi_i(\mathbf{r})$ имеет следующий вид, как можно видеть из (14):

$$\psi_i(\mathbf{r}) = G_i(\mathbf{r}') g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' = \frac{1}{2\pi} \int_{L_{oi}} \ln|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| \frac{ds_i}{v_0(\mathbf{r}_i)} \quad (16)$$

В систему уравнений (15) входят $N+1$ неизвестных коэффициентов — N значений λ_i и константа C . Для их определения должны быть использованы $N+1$ уравнений. N уравнений получаются подстановкой (9) в (13): $\alpha \mathbf{R} \boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{G} \boldsymbol{\psi}^T \boldsymbol{\Lambda} + C \mathbf{t}_0 - \delta \mathbf{t}$. Вводя обозначение матрицы $\mathbf{S} = \mathbf{G} \boldsymbol{\psi}^T$, получаем:

$$(\mathbf{S} - \alpha \mathbf{R}) \boldsymbol{\Lambda} + C \mathbf{t}_0 = \delta \mathbf{t} \quad . \quad (17)$$

Регуляризующий член $-\alpha \mathbf{R}$ в случае независимых и равноточных данных принимает вид $-\alpha \sigma^2 \mathbf{I}$ (где σ — среднеквадратичное отклонение), а при абсолютно точных данных становится равным нулю (Левин и др., 2022).

В уравнении (17) $\boldsymbol{\Lambda}$ — вектор неизвестных коэффициентов λ_i , \mathbf{t}_0 — вектор времен пробега по трассам в модели начального приближения, а \mathbf{S} — лучевая матрица с элементами

$$S_{ij} = \psi_i(\mathbf{r}) G_j(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \frac{1}{2\pi} \int_{L_i} |r_i - r_j| \frac{ds_i ds_j}{v_0 v_0} \int_{L_j} \ln. \quad (18)$$

Для решения системы уравнений (15) необходимо ещё одно уравнение. Оно получается из условия $m = const$ $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$. При $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$ базисные функции (16) стремятся к бесконечности как $\frac{\ln \rho}{2\pi} \int_{L_{oi}} \frac{ds_i}{v_0(\mathbf{r}_i)} = \frac{t_{oi} \ln \rho}{2\pi}$. Для того, чтобы в соответствии с (15) m была конечной при $|\mathbf{r}| \rightarrow \infty$, необходимо, чтобы выполнялось $\sum_i \lambda_i t_{oi} = 0$, или

$$\boldsymbol{\Lambda}^T \mathbf{t}_0 = 0. \quad (19)$$

Уравнения (17) и (19) образуют систему из $N+1$ уравнений для определения $N+1$ неизвестных коэффициентов — N значений λ_i и константы C (Левин и др., 2022).

Базисные функции (16) и элементы лучевой матрицы (16) в виде интегралов по одному (i -му) и двум лучам (i -му и j -му) могут быть вычислены как численно, так и аналитически. Возможность вычисления базисных функций и элементов лучевой матрицы аналитически является одним из преимуществ рассматриваемого метода Дитмара-Яновской (Левин и др., 2022).

1.3 Примеры применение методов MASW и SWT

Метод MASW впервые был представлен в 1999 году в журнале GEOPHYSICS (Park et al., 1999). В своей статье авторы показали высокую эффективность данного метода для решения инженерно-геологических задач. С тех пор с каждым годом наблюдается увеличение внимания к данному методу, он активно применяется как на суше, так и на

акватории (Kaufmann et al., 2005; Long et al., 2020; Lin et al., 2004; Park et al., 2005; Paoletti et al., 2013; Puech et al., 2004; Suto, 2007).

Например, в статье 2005 года Park, Miller и другие применяли метод MASW для выделения участков осадков на шельфе атлантического океана у острова Ньюфаундленд, целью работ было выделение участков переуплотнения отложений, вызванных движениями ледника (Рисунок 1.5.1).

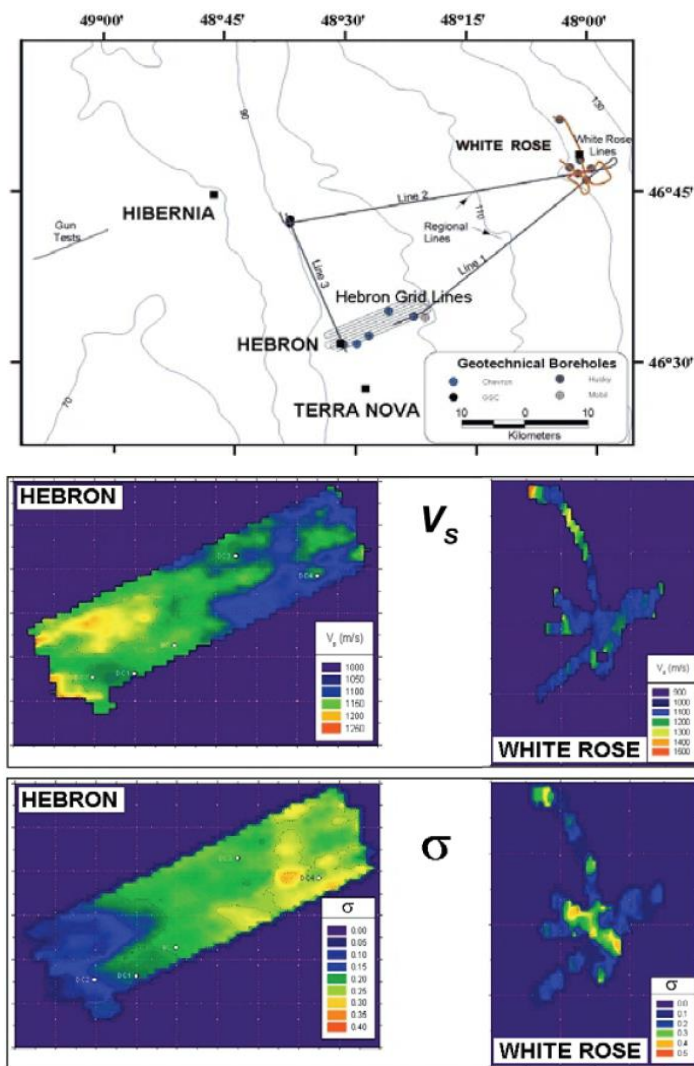


Рисунок 1.5.1 Применение MASW, для выделения участков переуплотнения отложений на шельфе атлантического океана у острова Ньюфаундленд. (Park et al., 2005)

Параллельно с развитием метода MASW, появляются попытки анализа поверхностных волн в рамках метода поверхностно-волновой томографии для решения инженерных задач (Long and Kocaoglu, 1999; 2001). В последнее время среди работ зарубежных авторов встречается всё больше статей по методу поверхностно-волновой томографии и его применению для решения инженерных задач на суше и акваториях (Alyousuf et al., 2017; Boiero et al., 2013; Bohlen et al., 2004; Ikeda and Tsuji, 2018; Klein et al., 2005; Kugler et al., 2007; Long and Kocaoglu, 2001; Rector et al., 2015). Среди работ

отечественных авторов есть интересные статьи в области инженерной геофизики о использовании томографии поверхностных волн для оценки параметров водоёмов (Буров и др., 2015; Преснов и др., 2019; Presnov et al., 2016).

Например, в статье 2007 года Kugler, Vohlen и другие, взяли архивные данные, дополнили их новыми работами с донным оборудованием, на мелководье Балтийского моря у берегов северной Германии. И проанализировали насколько эффективно традиционные методы и методы поверхностно-волновой томографии решает задачу по изучению структуры морских осадков (Рисунок 1.5.2).

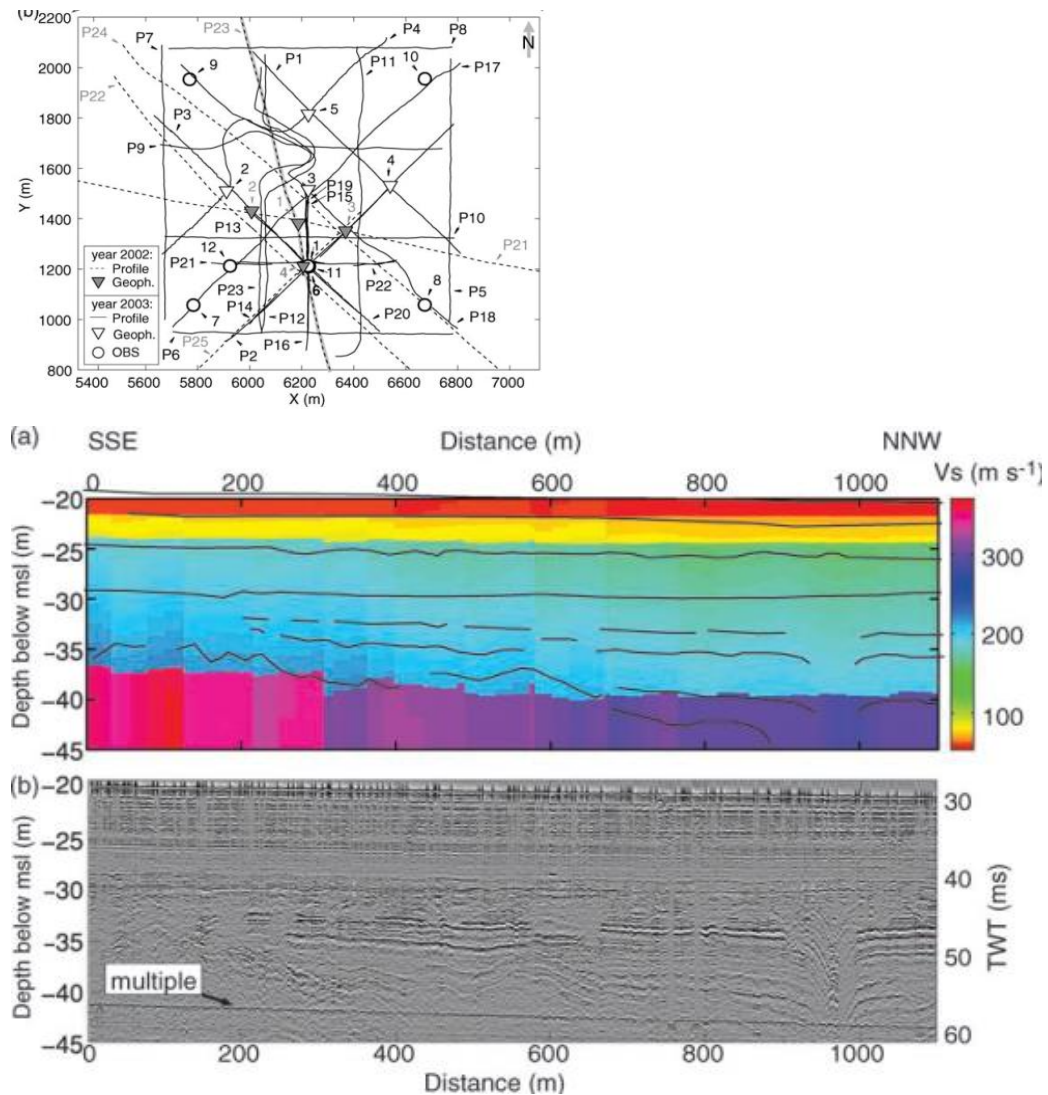


Рисунок 1.5.2 Применение SWT, для изучения морских осадков на мелководье Балтийского моря у берегов северной Германии (Kugler et al., 2007).

2 ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА АКВАТОРИИ ОБСКОЙ ГУБЫ

2.1 Местоположение и геологическое строение участка работ

Сейсмические данные были получены в рамках выполнения инженерно-геофизических исследований на объекте «Обустройство газового месторождения Каменномысское-море». Заказчиком работ выступал ООО «ИнжГео», исполнитель инженерно-геофизических исследований ООО «СПЛИТ». Работы проводились с 30.07.2020 г. по 08.09.2020 г.

Участок находится на Акватории Обской губы Карского моря, территория Ямало-ненецкого автономного округа (ЯНАО) Тюменской области РФ. Схема расположения объекта представлена на рисунке 2.1.1.



Рисунок 2.1.1 Местоположение участка работ на спутниковом снимке

На участке работ было пробурено 10 скважин глубиной 70 метров. Геологический разрез сложен преимущественно песками, супесью и суглинками. Встречаются маломощные прослои торфа, пылеватых песков и включения гравия. Особенность геологического разреза заключается в том, что в верхней части разреза залегают газонасыщенные грунты.

В пределах участка можно выделить три геологических горизонта:

- Супесь с включениями гравия и органического вещества – первые 15 метров
- Песок водонасыщенный, с включением фауны, гравия с прослоями пылеватого песка – от 15 до 40 метров
- Суглинок/супесь с прослоями песка – глубже 40 метров

2.2 Методика и технология проведения сейсмических исследований

В связи с невысокой информативностью классической сейсмоакустической высокочастотной съемки с буксируемыми приемными устройствами по причине загазованности верхней части разреза, на площадке были выполнены исследования с использованием донных сейсмических станций. Данные работы были нацелены на получение данных о строении верхней части разреза, основываясь на информации поверхностных волн, на которые в меньшей степени влияет рассеянный газ в ВЧР.

Система раскладки станций была спроектирована для того, чтобы можно было в полной мере изучить участок как методом MASW, так и используя SWT.

Отстрел полигона проводился по сетке профилей изображенной на рисунке 2.2.1. Данная схема отстрела совмещает в себе отработку двух полигонов – 900х900 метров по ортогональной сети с шагом между линиями ПВ 150 метров, и 200х200 метров по ортогональной сети с шагом линий ПВ 25х50 метров с выносами по 100 метров с каждой из сторон уплотненного полигона. Плановая раскладка донных станций на полигоне приведена на рисунке 2.2.1 (Полевой отчет..., 2020). Данная раскладка совмещает несколько вариантов:

1. Полигон 900х900 метров с равномерной сеткой ПП 150х150 метров;
2. Полигон 200х200 метров в центре площадки со сгущенной равномерной сеткой ПП 25х50 метров;
3. «Крест» через центр площадки с шагом ПП – 75 метров;
4. Места скважин.

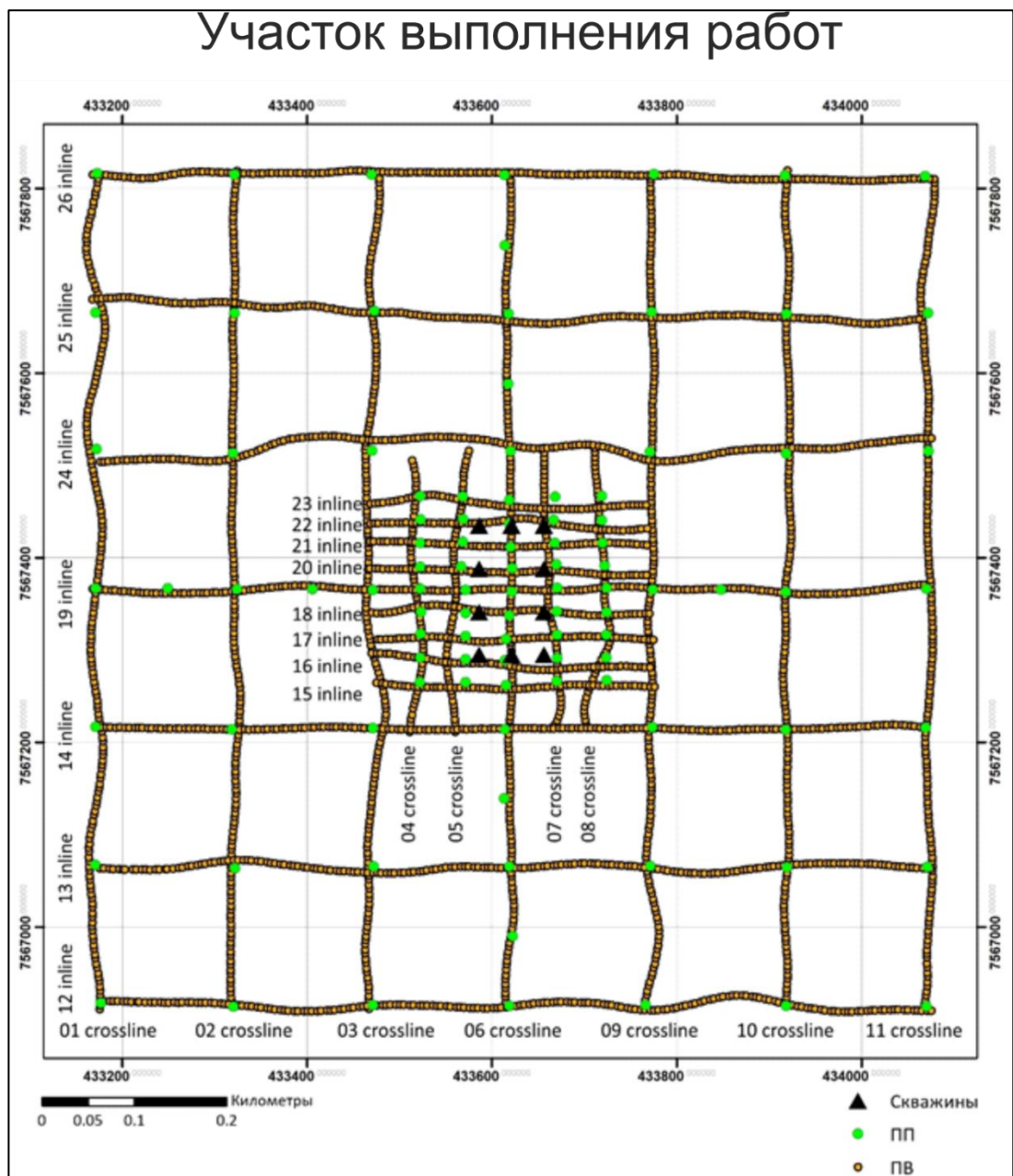


Рисунок 2.2.1 Схема расположения ПП, линий ПВ и скважин на участке работ

Для проведения работ было мобилизовано т/х «Николая Чудотворец», технические характеристики судна приведены в таблице 2.2.1 (Полевой отчет..., 2020).

Для геофизических исследований использовались донные сейсмические станции FireField Z700 компания производитель Magseis Fairfield ASA в количестве 100 шт. Для отработки линий ПВ использовались 2 пневмоисточника малого объема SleeveGun I (объем 328 см³) компрессор высокого давления ДК-2. Буксировка ПИ (пневмоисточника) осуществлялась с кормы судна в 15 метрах от кормы. Заглубление ПИ было выбрано в ходе ОМР и составило около 5 метров. Шаг ПВ составлял 5 метров. Станции были разложены по дну на глубине 11 метров. Технические характеристики оборудования приведены в таблице 2.2.2 (Полевой отчет..., 2020).

Таблица 2.2.1 Технические характеристики т/х «Николай Чудотворец»

т/х «Николай чудотворец»		
Параметр	Значение	Фото
Постройка	Котлас, 1977, проект Р-33Б; модернизации: 2008, 2017	
Порт приписки	Архангельск	
Флаг	РФ	
Размеры	Длина 32,00 м, ширина 7,60 м, высота борта 2,50 м, осадка максимальная 1,8 м, валовая вместимость 206,70 т, водоизмещение 231 т, скорость максимальная 10 уз.	
Силовая установка	Два главных двигателя: 6NVD-26A3, 2x272 кВт; генератор 1x60 кВт; судовая сеть 220/380В/50Гц; два винта с насадками	
Автономность судна	По топливу/пресной воде на полном ходу – 30 суток	
Палубное снаряжение	Крано-манипуляторная установка грузоподъемностью 3000 кг. В кормовой части судна над капом возможна установка 5-10 фут. контейнера или площадка длиной 7 метров и шириной 6 метров для установки научного оборудования.	

Таблица 2.2.2 Оборудование для геофизических исследований

Автономная донная сейсмическая станция FireField Z700		
Параметр	Значение	Фото
Кол-во каналов	4	
Шаг дискретизации	2/4 мс	
Усиление	0-36 dB	
Рабочая температура	от -10 до +60 °С	
Автономность	14 суток	
Температура обслуживания	от +3 до +40 °С	
Время полной зарядки	не более 8 ч	
Таймер	CSAC clock	
Вес в воздухе	29 кг	
Вес в воде	18 кг	
Габариты ШxВ	43.2x15.2 см	
Рабочие глубины	до 700 м	
Пневмопушка Sleeve Gun I		
Параметр	Значение	Фото
Объем источника	328 см ³	
Ган-контроллер	RGC-4	
Длина магистрали	50 м (2 шт.)	
Рабочее давление	2000 psi	
Компрессор высокого давления ДК-2		
Параметр	Значение	Фото
Рабочее давление	230 атм.	
Максимальное давление	250 атм.	
Фактический вес	900 кг	
Тип топлива	ДТ	

2.3 Анализ волнового поля

Для анализа волнового поля выбрана центральная донная станция под номером 49. На рисунке 2.3-1 и 2.3-2 представлена сейсмограмма ОПП на 6 профиле (crossline), на рисунке 2.3-3 АЧХ для выделенных волн.

В результате анализа волновой картины (рисунок 2.3-1), можно сказать что на сейсмограммах выделяются:

- водная волна – красная линия;
- головная волна с – синяя линия;
- фундаментальная мода поверхностной волны Шольте – зеленая линия;
- высшие моды поверхностной волны Шольте – фиолетовая линия;
- шум от движения судна – оранжевая область.

Следует отметить, что поверхностные волны очень слабо затухают, поэтому на одной сейсмограмме можно наблюдать аналогичные волны от предыдущего взрыва (светло-зеленая линия).

Анализ спектральной картины позволяет сказать, что на спектрах АЧХ можно выделить 2 частотные полосы от 2 до 25 Гц и от 125 до 220 Гц. Водная волна характеризуется высокочастотным спектром, поверхностным волнам Шольте отвечают низкие частоты.

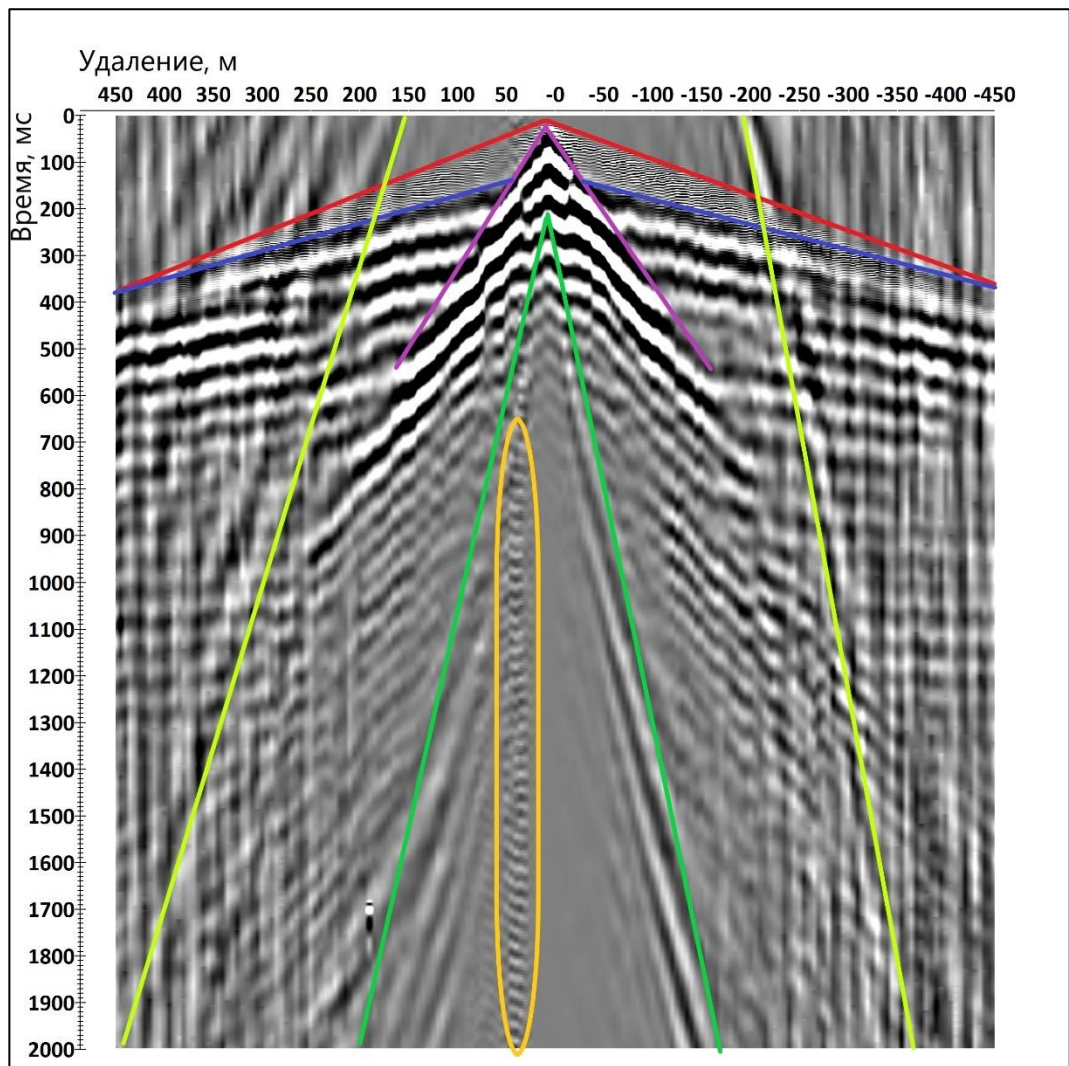


Рисунок 2.3-1 Сейсмограмма ОПП для донной станции 49 на профиле 6.
Анализ волнового поля.

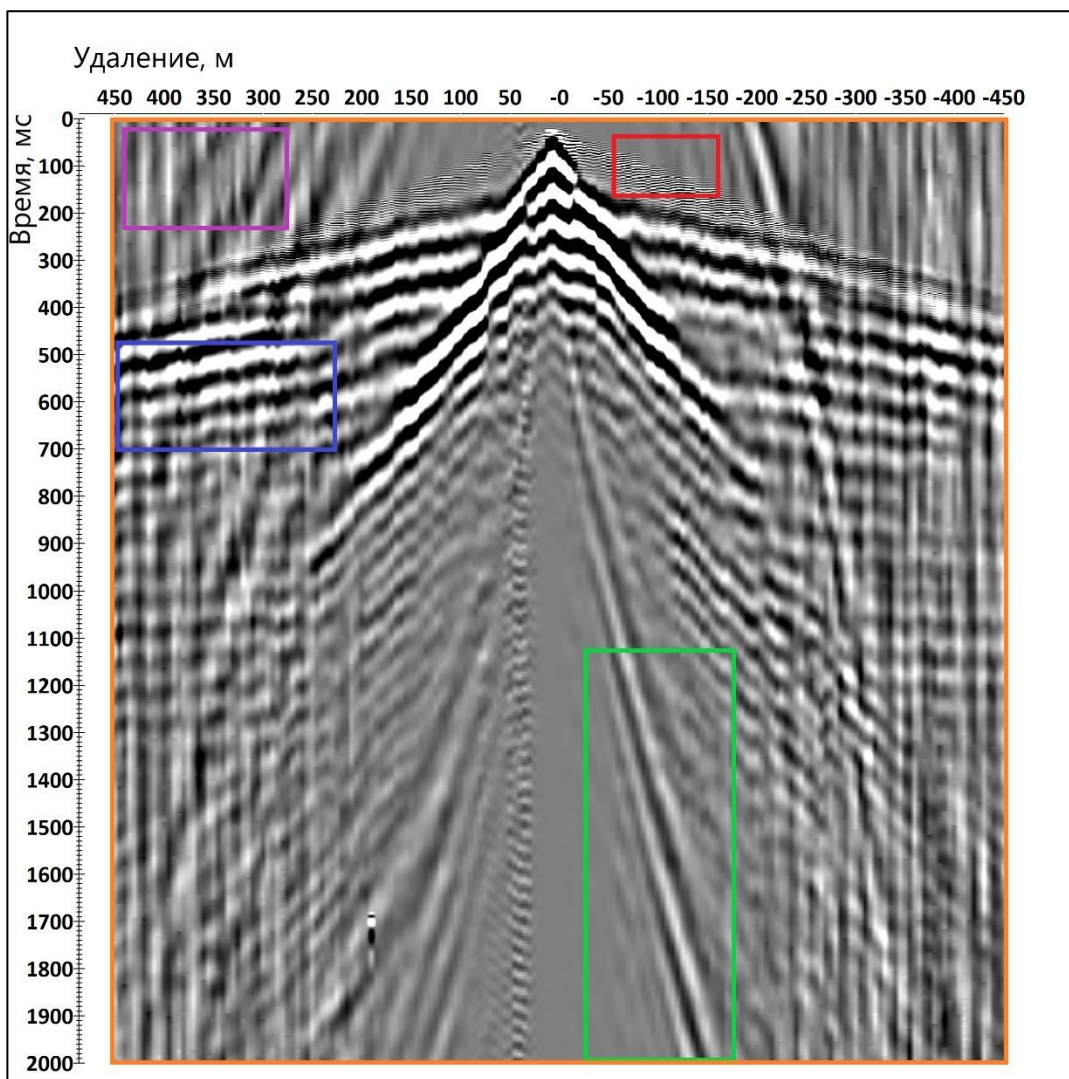


Рисунок 2.3-2 Сейсмограмма ОПП для донной станции 49 на профиле 6. Области расчета АЧХ.

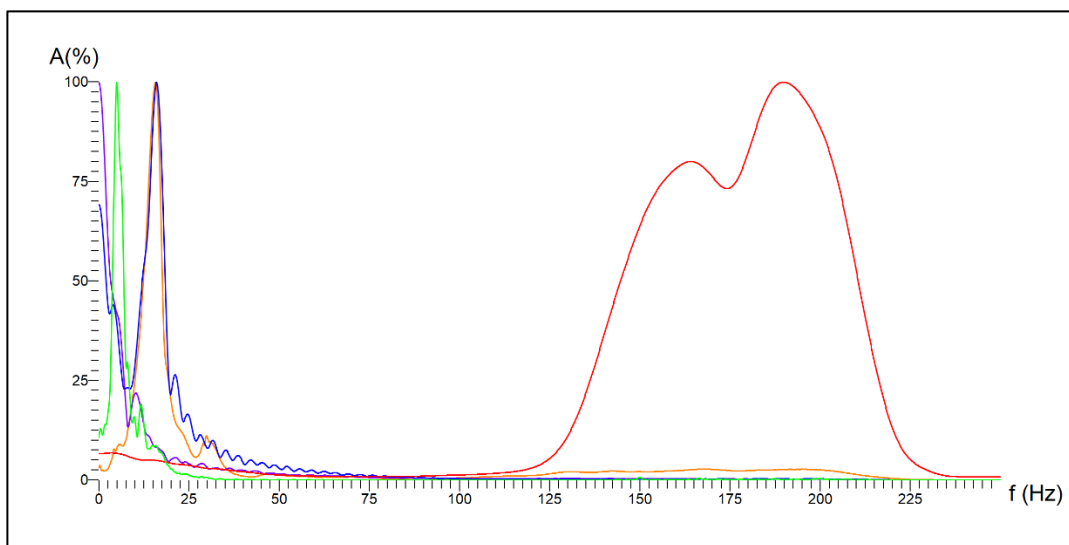


Рисунок 2.3-3 Спектры АЧХ, рассчитанные по областям, представленным на рисунке 2.3-2. Оранжевый цвет – вся сейсмограмма, красный цвет – водная волна, синий цвет – преломленные волны, зеленый цвет – поверхностные волны Шольте, фиолетовый цвет – нерегулярные помехи.

2.4 Обработка данных по методу MASW

Обработка поверхностных волн в рамках метода MASW проводилась в программном обеспечении RadExPro (v.2021.1). Как было сказано в главе 1.1 обработка производится три этапа граф обработки для каждого из этапов представлен ниже:

I этап – выделение целевых волн (Рисунок 2.4-1):

- Сортировка данных по наборам, включающим в себя каждый 2D профиль по отдельности;
- Сортировка данных на фланговые сейсмограммы для каждой донной станции;
- Обращение геометрии;
- Частотная фильтрация в диапазоне от 2 до 6 Гц, фильтром Баттерворта, для выделения поверхностных волн;
- Обнуление (мьютинг) области в которых отсутствуют целевые волны, границы задавались вручную;
- Разделение сейсмограмм на две ветви, по значению удалений, на выбранную базу наблюдений.

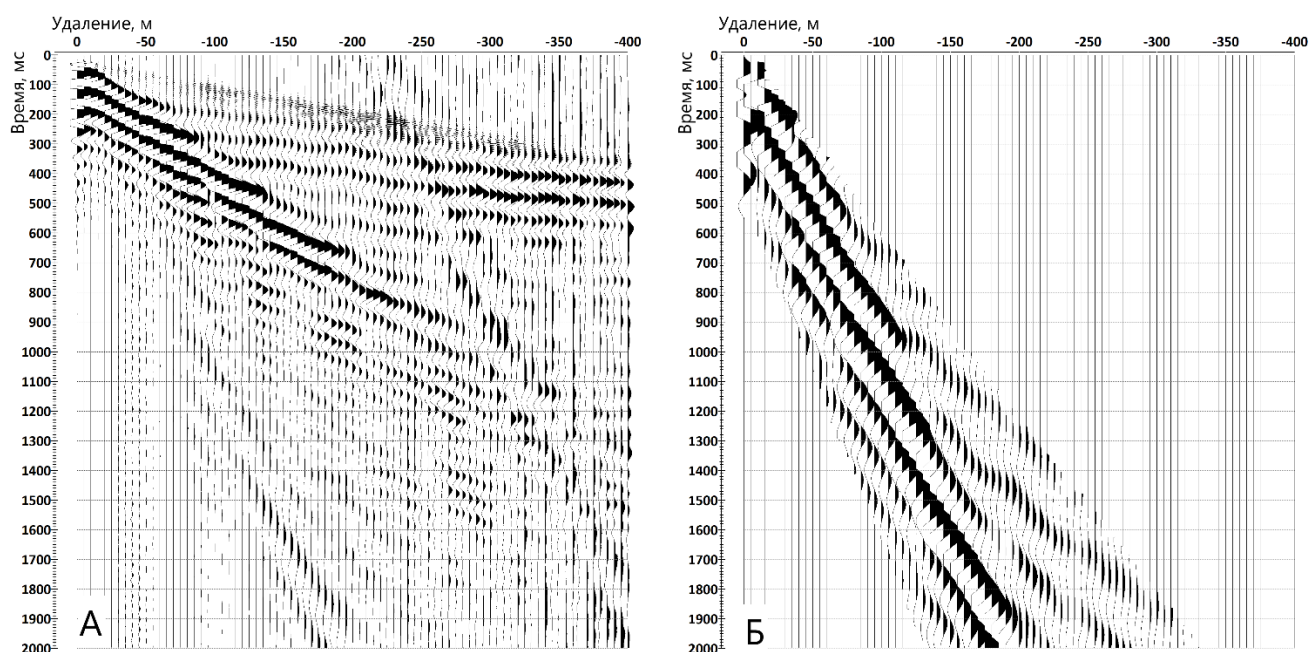


Рисунок 2.4-1 I этап обработки MASW. А – исходная сейсмограмма, Б – сейсмограмма после применения фильтрации и мьютинга

II этап – получение и анализ дисперсионных изображений (Рисунок 2.4-2):

- Подготовленные данные подаются в модуль MASW, который рассчитывает дисперсионные кривые. Происходит разбраковка полученных изображений, убираются те, которые не несут полезной информации или интерпретируются неоднозначно;
- Считывание измеренных дисперсионных кривых.

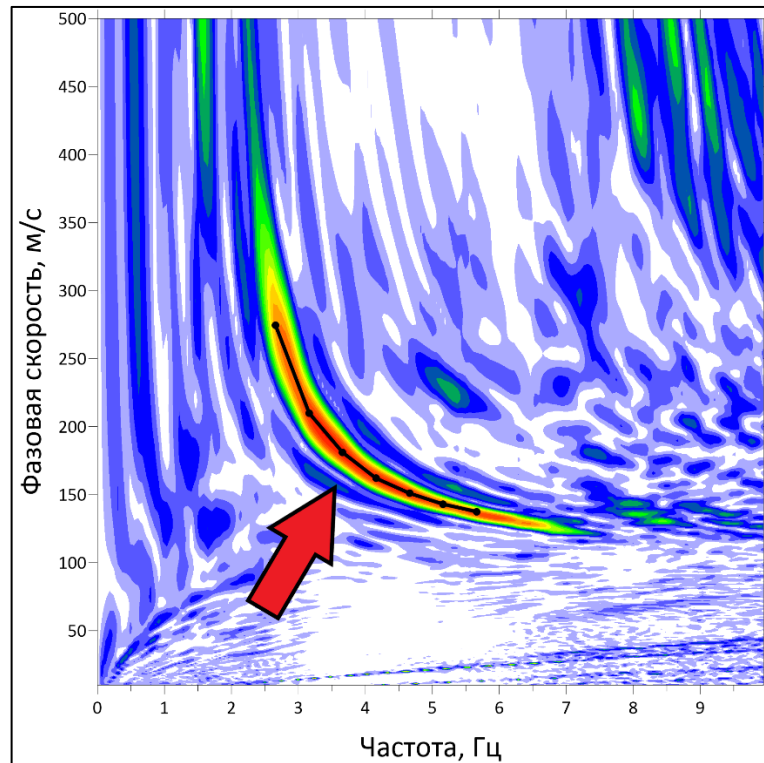


Рисунок 2.4-2 II этап обработки MASW. Дисперсионное изображение и считанная кривая фундаментальной моды (красная стрелка)

III этап – инверсия данных (Рисунок 2.4-3):

- Задаются параметры начальной модели. Глубина полупространства задается как половина максимальной длины волны. Плотность и коэффициент Пуассона берут из лабораторных данных, полученных после бурения.
- Подбор теоретической кривой, наилучшим образом описывающий измеренную.

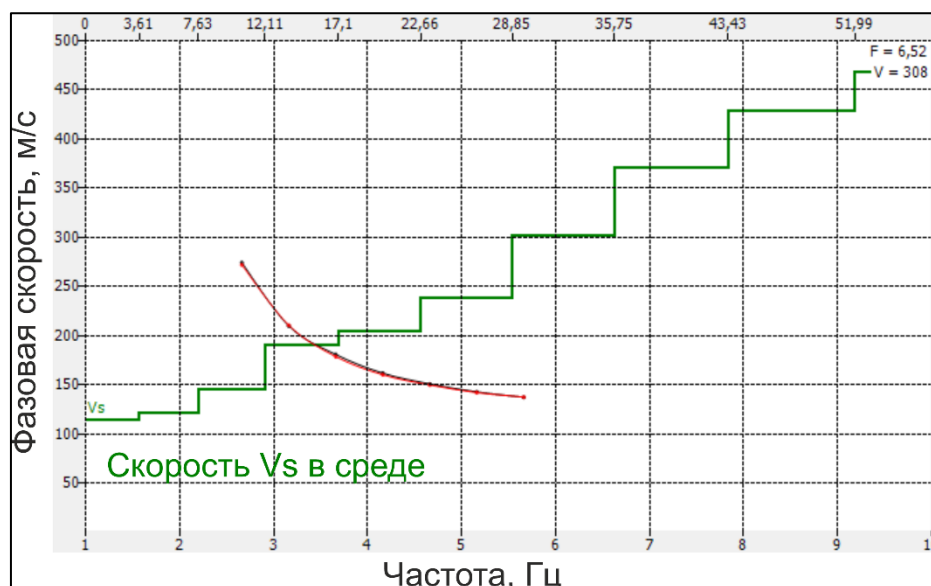


Рисунок 2.4-3 III этап обработки MASW. Инверсия дисперсионной кривой, и подбор скоростной зависимости

2.5 Обработка данных по методу SWT

Обработка поверхностных волн в рамках метода MASW проводилась в программном обеспечении RadExPro (v.2021.1). Принцип обработки был взят из статьи 2001 года под авторством Long, L. T. et al.

В статье предлагается обрабатывать сигнал в t - x области. Необходимо подготовленные данные отфильтровать узкополосным фильтром. После фильтрации максимальная амплитуда сигнала соответствует групповой скорости поверхностной волны. Для того чтобы получить положение максимума, получаем аналитический сигнал используя преобразования Гилберта в мгновенных амплитудах (рисунок 2.5.1).

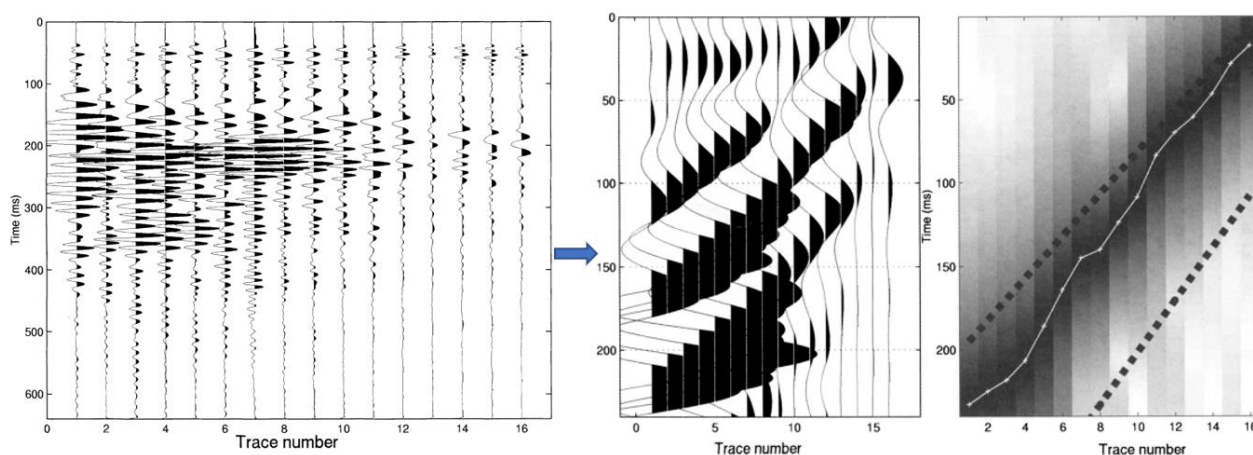


Рисунок 2.5.1 Обработка поверхностных волн для метода SWT (Long L.T. et al, 2001)

Обработка проводится в три этапа: первый –выделение целевых волн, второй – получение аналитического сигнала и пикировка, третий – инверсия данных.

I этап – выделение целевых волн (рисунок 2.5.2):

- Обращение геометрии;
- Сортировка данных по наборам, включающим донные станции и все удаления, на которых прослеживается поверхностная волна для конкретной донной станции;
- Частотная фильтрация в диапазоне от 2 до 6 Гц, фильтром Баттерворта, для выделения поверхностных волн (при необходимости допускается применение фильтрация в f-k области);
- Обнуление (мьютинг) области в которых отсутствуют целевые волны, границы задавались вручную.

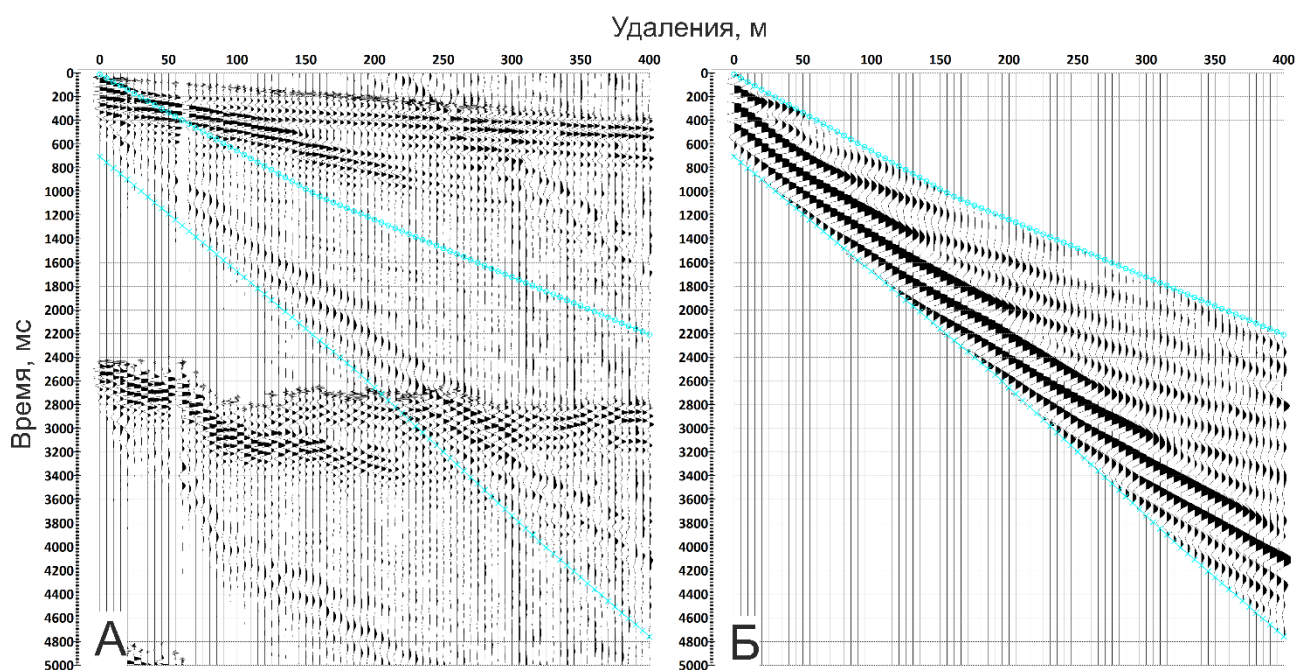


Рисунок 2.5.2 I этап обработки SWT. А) Исходные данные. Голубым цветом выделена область распространения поверхностных волн; Б) Поверхностные волны после применения фильтрации и мьютинга.

II этап - получение аналитического сигнала и пикировка (рисунок 2.5.2):

- Анализ дисперсионных кривых для получения диапазона частот и групповых скоростей характерных для каждой из частот;
- Частотная фильтрация узкополосным полосовым фильтром в полученном диапазоне с некоторым шагом;

- Получение аналитического сигнала за счет преобразование Гилберта, в мгновенных амплитудах;
- Пикировка максимумов аналитического сигнала;

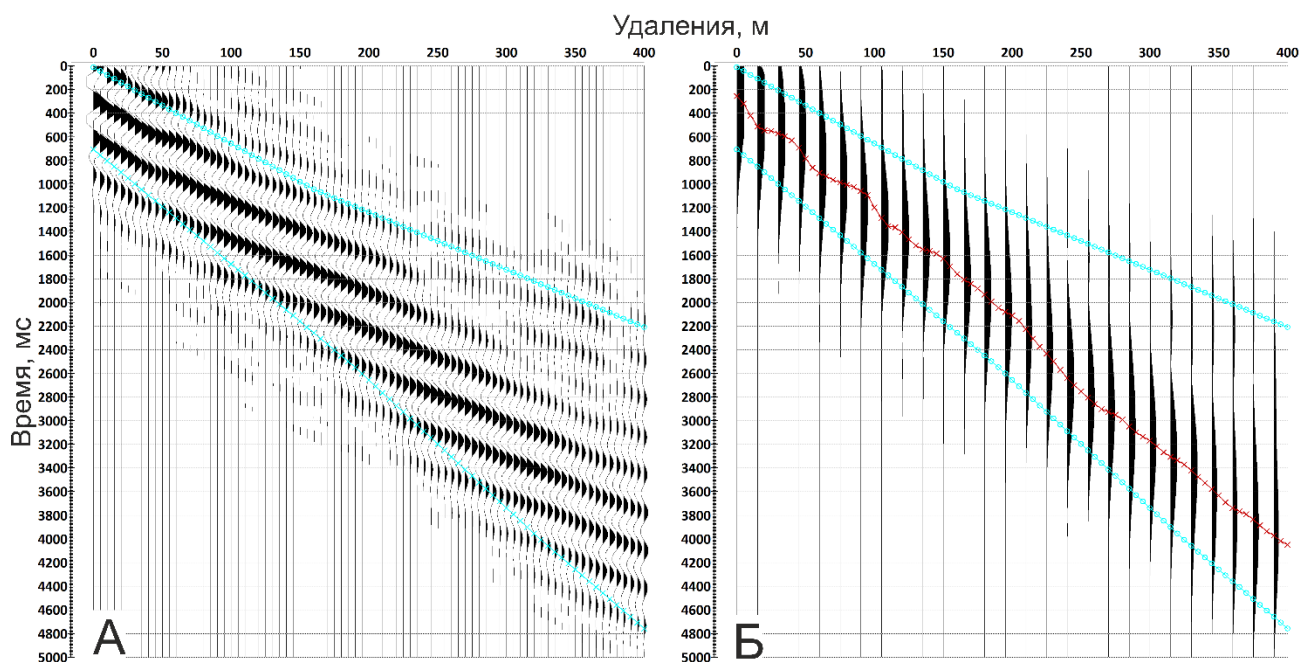


Рисунок 2.5-3 II этап обработки SWT. А) Узкополосная фильтрация; Б) Аналитический сигнал после преобразования Гилберта, красная линия соответствует максимуму сигнала.

Необходимо уточнить, что качество данных очень сильно влияет на аналитический сигнал. К влияющим факторам относятся: нерегулярные помехи, совпадающие по частоте с полезным сигналом, влияние интерференции с объемными волнами и поверхностными волнами от соседних взрывов.

Поэтому пикировку следует проводить, руководствуясь следующими правилами:

- Пикировать необходимо с оглядкой на групповые скорости характерные для данной частоты. Для получения предельных значений групповых скоростей необходимо провести моделирование дисперсионных кривых;
- Фаза необязательно должна приходиться на большее время с увеличением удаления, но надо отсеивать резкие выбросы;

Также на этапе пикировки возник вопрос, как влияет фильтрация на аналитический сигнал, в процессе обработки пикируется дисперсия поверхностной волны или артефакты фильтрации/ Для того чтобы проверить этот вопрос было выполнено несколько тестов.

Принцип теста заключался в том, чтобы взять объемные волны, провести с ними процедуры необходимые для получения аналитического сигнала и прокоррелировать. Затем

аналогично поступить с поверхностными волнами и оценить влияние фильтрации на аналитический сигнал.

Тест №1. В рамках теста рассматривалась отраженная волна, полученная от модельных данных, представляющих собой двухслойный горизонтальный разрез (Приложение А – рисунок А.1). Результаты представлены на рисунке 2.5.4.

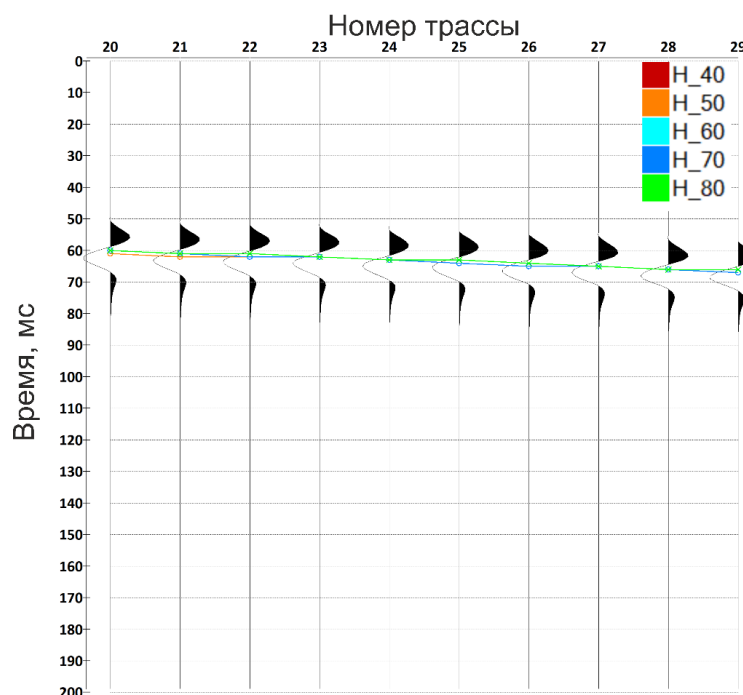


Рисунок 2.5.4 Тест №1. Исходные данные с наложенными пикировками аналитического сигнала на разных частотах, справа представлен спектр отраженной волны;

Анализ показывает, что наибольшее расхождение между пикировками составляет не больше 5 мс. В среднем же отклонение составляет 2 мс. Что является несущественным влиянием фильтрации. Таким образом можно сказать, что для смоделированной отраженной волны дисперсия не наблюдается.

Тест №2. В рамках теста рассматривались реальные наземные данные, взятые с сайта radexpro.com. Преломленная волна и поверхностная волна Рэлея. Для данных в этом тесте характерен широкий частотный диапазон поверхностных волн от 10 до 50 Гц, преломленные волны накладываются по частоте на поверхностные (Приложение А – рисунок А.2).

Результаты теста приведены на рисунке 2.5.5. Анализ показывает, что на преломленной волне также не наблюдается дисперсии, наибольшие отклонения составляют 5 мс, Поверхностные волны, наоборот показывают сильные разбросы в пропикированных значениях (100 мс между наибольшей и наименьшей частотами), которые можно соотнести с дисперсией поверхностных волн.

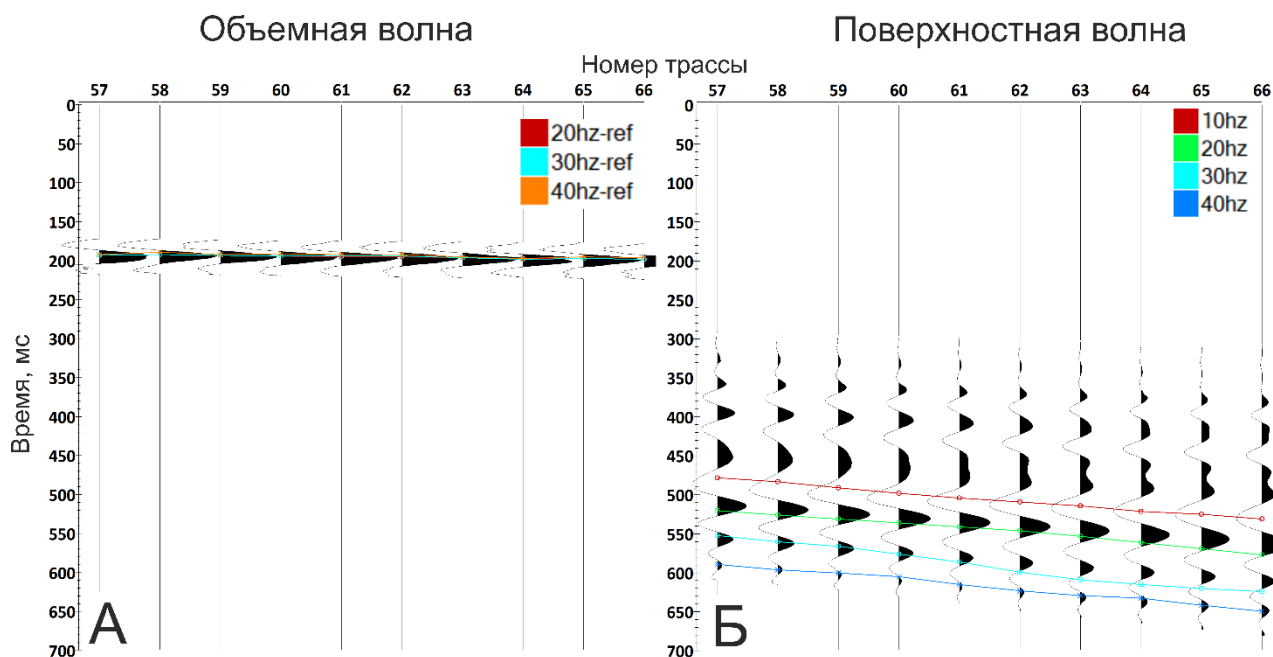


Рисунок 2.5.5 Тест № 2. А) Преломленная волна с наложенными результатами пикировки аналитического сигнала; Б) Поверхностная волна Рэля с наложенными пикировками аналитического сигнала

Тест № 3. В рамках теста рассматривались реальные данные с Обской губы. Преломленная волна и поверхностная волна Шольте (Приложение А – Рисунок А.3). Для поверхностных волн характерен узкий частотный диапазон поверхностных волн от 3 до 5 Гц. Преломленные волны при этом находятся в диапазоне от 10 до 20 Гц.

Результаты теста приведены на рисунке 2.5.6. На изображениях видно, что результат идентичен прошлому тесту, на преломленной волне также не наблюдается дисперсии, тогда как на поверхностных волнах дисперсия проявлена в полной мере.

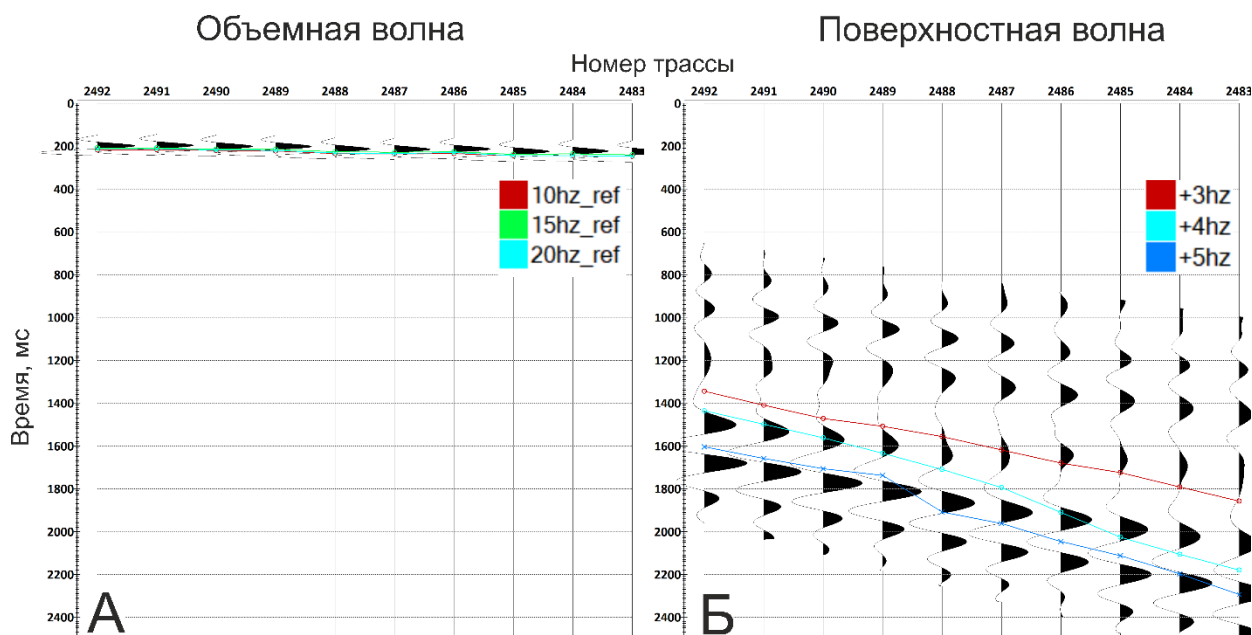


Рисунок 2.5.6 Тест № 3. А) Преломленная волна с наложенными результатами пикировки аналитического сигнала; Б) Поверхностная волна Шольте с наложенными пикировками аналитического сигнала

III этап – инверсия данных:

- Получения распределения групповых скоростей на каждой считанной частоте и построение дисперсионных кривых;
- Создание начальной модели;
- Подбор теоретической кривой, наилучшим образом описывающий измеренную.

Принципиальное отличие поверхностно-волновой томографии (SWT) от метода MASW, заключается в том, что в SWT используются групповые скорости. Общего закона, описывающего взаимосвязь между групповыми и фазовыми скоростями нет, но можно выделить качественные закономерности, которые характерны для фазовых и групповых скоростей. Групповые скорости обычно ниже, чем фазовые, это различие наиболее заметно на низких частотах и уменьшается на высоких частотах (Leontarakis et al., 2019).

Перед обработкой, для того чтобы оценить значения групповых скоростей на данном участке работ, было проведено моделирование дисперсионных кривых для групповых скоростей в нескольких точках на площади. Суть моделирования сводилась к тому, что были выбраны дисперсионные кривые для фазовой скорости, от них построены одномерные модели скорости поперечных волн и затем для полученных моделей были построены дисперсионные кривые групповых скоростей (рисунок 2.5.7).

Моделирование проводилось с использованием открытого программного обеспечения, реализованного на языке программирования MatLab. Создателями ПО являются Glenn J. Rix and Carlo G. Lai, алгоритм для построения кривых основан на работах Xiaofei Chen (1993), Hisada, Y. (1994) и Lai, C.G. (1998).

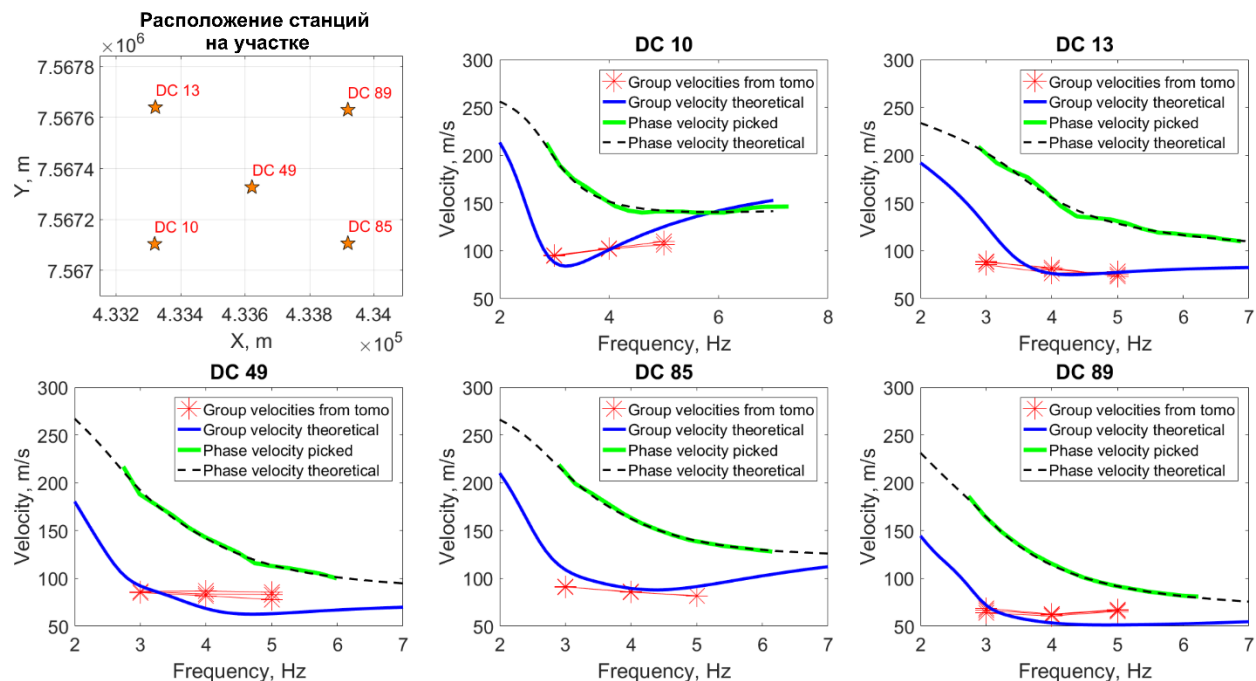


Рисунок 2.5.7 Результат моделирования дисперсионных кривых групповых скоростей для моделей полученных из разных мест в пределах участка работ. Пунктирная линия – теоретическая дисперсионная кривая фазовых скоростей, зеленая линия – реальная дисперсионная кривая фазовых скоростей, синяя линия – теоретическая дисперсионная кривая групповых скоростей, красная линия (звезды) – реальная дисперсионная кривая групповых скоростей.

Проведенное моделирование позволило сделать вывод о том, что дисперсия групповых скоростей в диапазоне частот от 3 до 5 Гц достаточно слабая, скорости варьируются от 50 до 140 м/с. Кроме того подтвердили закономерность, что групповые скорости имеют более низкие скорости относительно фазовых, в среднем фазовые скорости больше чем групповые в 1.8.

3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ

3.1 Результаты обработки по методу MASW

Результаты обработки поверхностных волн по методу MASW представлены на Рисунках 3.1.1 – 3.1.2. База наблюдений составляла 75 метров. Глубинность метода составляет 32 метра.

По данным бурения граница супесь-песок, которая разделяет первый и второй инженерно-геологический элемент, расположена на глубине от 20 до 25 метров и удовлетворительно коррелирует с изолинией 200-250 м/с на разрезах поперечных волн, полученных после инверсии по методу MASW (рисунок 3.1-1). Границу песок-супесь/суглинок, разделяющую второй и третий инженерно-геологические элементы проследить не удастся, так глубинность метода оказывается недостаточной. Срезы поперечных скоростей показывают, что исследуемая площадка представляет собой участок с однородным геологическим строением до глубины 32 метра (рисунок 3.1-2).

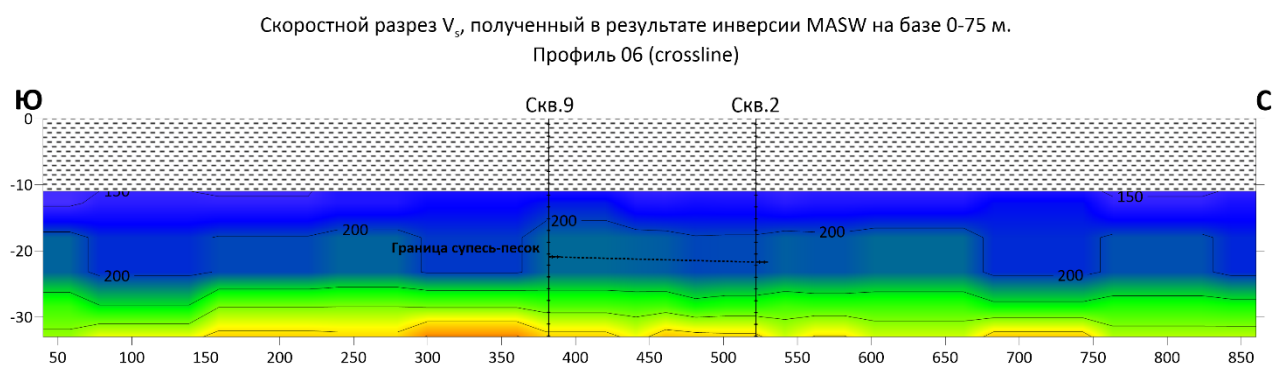


Рисунок 1.1.1 Результат обработки по методу MASW, для профиля 6 с нанесенными скважинами.

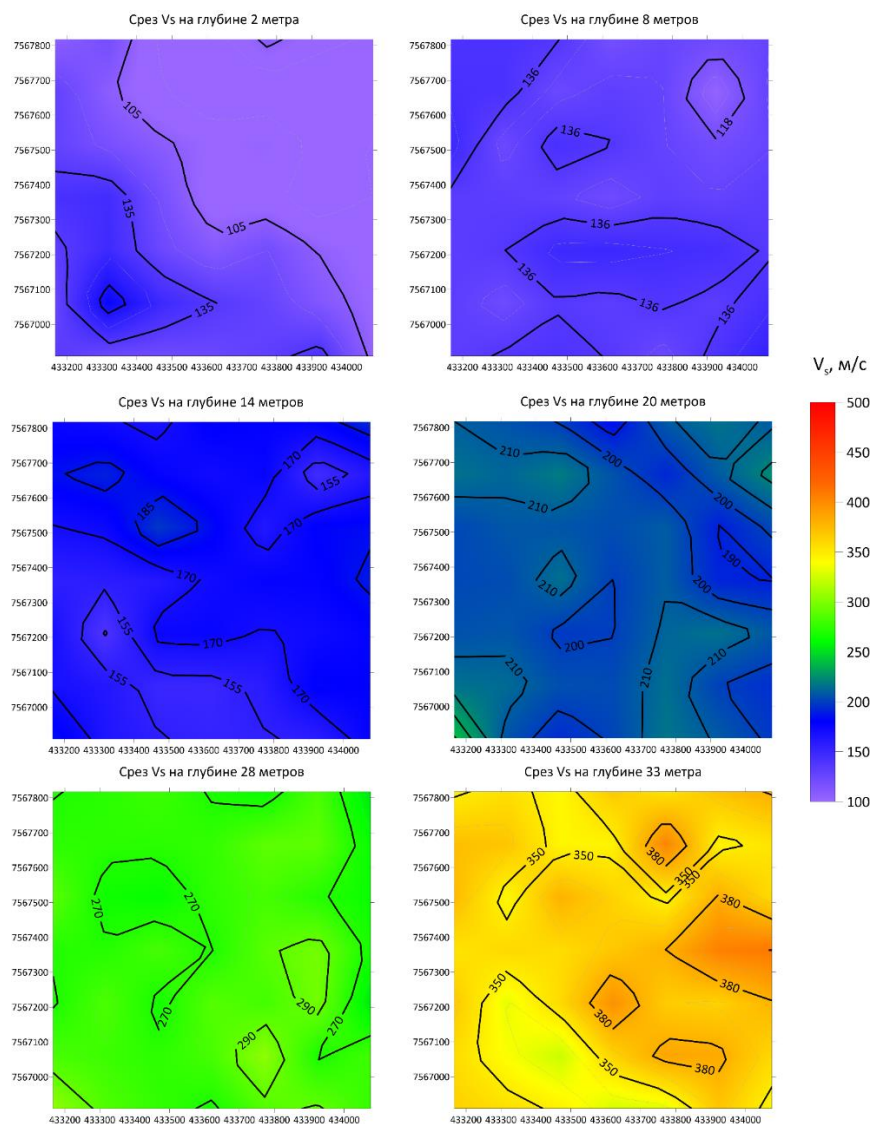


Рисунок 3.1.2 Срезы скоростей V_s полученные в результате инверсии по методу MASW на базе 75 метров.

3.2 Результаты обработки по методу SWT

Результаты обработки поверхностных волн по методу SWT представлены на рисунке 3.2-1. Максимальные удаления которые были включены в обработку составляли 400 метров. Из-за особенности волновой картины (смотри главу 2.3 Анализ волнового поля), на удалениях больше 400 метров соотношение сигнал/шум для поверхностной волны резко падает из-за интерференции с целевыми волнами от соседних взрывов и усиления нерегулярных помех.

Таким образом были получены срезы групповых скоростей поверхностных волн для набора частот от 3 до 5 Гц с шагом в 1 Гц (рисунок 3.2.1). Общая структура, говорит о том, что в северо-восточной углу участка наблюдается область распространения

пониженных скоростей. Подобную картину мы также наблюдаем на срезах фазовых скоростей, полученных в результате обработки по методу MASW на рисунке 3.2.2. Срезы фазовых скоростей более контрастные, так как фазовая скорость для данной структуры меняется в больших пределах. Тем не менее общие закономерности прослеживаются и хорошо коррелируют между собой для разных подходов.

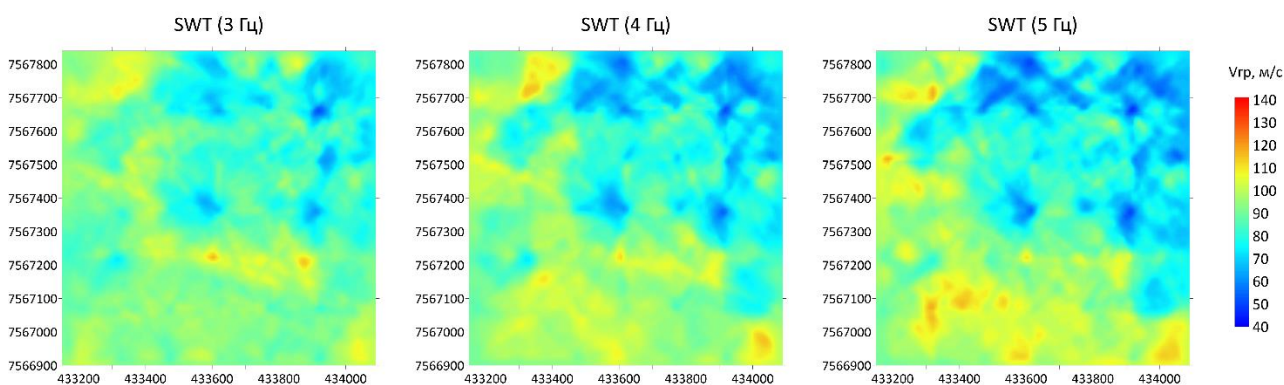


Рисунок 3.2.1 Срезы групповых скоростей, полученные в результате обработки по методу SWT, для разных частот

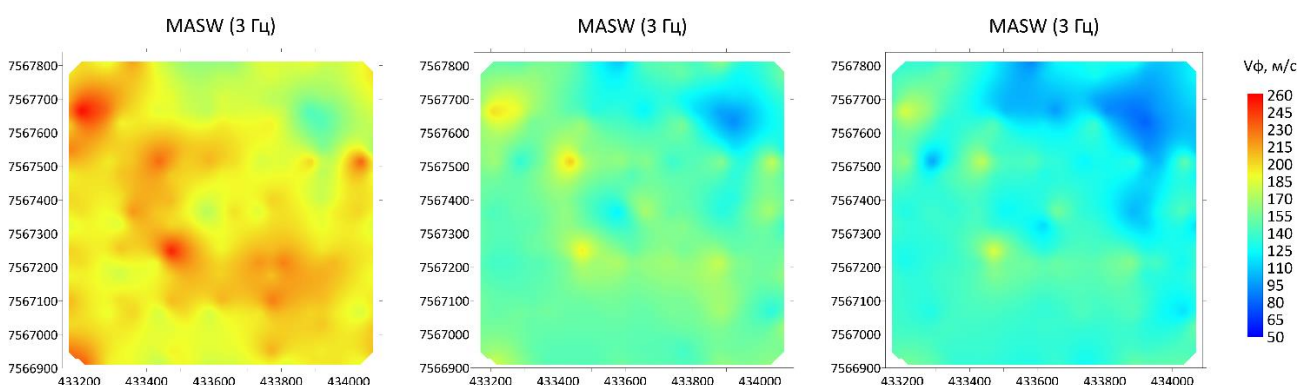


Рисунок 3.2.2 Срезы фазовых скоростей, полученные в результате обработки по методу MASW, для разных частот.

Недостатком поверхностно-волновой томографии является сильная зависимости от качества данных. При сильном влиянии помех, могут возникать неоднозначные варианты пикировок, которые впоследствии выдадут ложные аномалии. Отличить же ложные аномалии от реальных практически невозможно, без наличия априорных данных.

3.3 Оптимизация системы наблюдений для площадных исследований

В рамках проведения площадных инженерно-геофизических исследований на Обской губе, изначально была задана избыточная система наблюдений, включающая в себя частую сеть донных станций (150 на 150 метров) с шагом между ПВ в 5 метров. Так как

раскладка донных станции это трудоемкая, времязатратная и крайне дорогостоящая процедура, возник вопрос, можно ли разредить сеть наблюдений для работы на поверхностных волнах без потери качества.

Изменять любую систему наблюдений можно несколькими подходами, все они основаны на уменьшении или увеличении расстояния между пунктами взрыва, либо между пунктами приема.

В рамках поверхностных волн возможна реализация двух подходов, метода MASW и метода SWT.

Так как метод MASW по сути своей является точечным методом, изменение количества донных станций, напрямую связано с горизонтальной разрешающей способностью. С уменьшением количества точек записи всегда будет уменьшаться разрешающая способность. Таким образом сравнивать результаты с разным количеством донных станций нецелесообразно. Для метода MASW наиболее актуально какое количество каналов необходимо для получения устойчивых дисперсионных кривых.

Для того чтобы проверить это, был выбран центральный профиль под номером 6. База наблюдения равнялась 100 метрам. И для тестов было выбрано следующее разрежение: весь набор данных (шаг между ПВ – 5 м), каждая вторая трасса (шаг между ПВ - 10 м), каждая третья трасса (шаг между ПВ - 15 м), каждая четвертая трасса (шаг между ПВ – 20 м), каждая пятая трасса (шаг между ПВ – 25 м). Результаты тестирования для метода MASW представлены в Приложении Б.

Анализ результатов показывает, что при шагах от 5 до 10 метров, результат инверсии воспроизводится практически без изменений. Дисперсионные кривые теряют в интенсивности, но положение максимума энергии поверхностной волны выделяется однозначно (Приложение Б – рисунок Б.1). При увеличении шага до 15 и больше метров, общее распределение скоростей сохраняется, но разрешающая способность по вертикали уменьшается. На дисперсионных кривых падает интенсивность максимума от поверхностной волны, начинают размываться крайние частоты, становится сложно выделить положение минимальной и максимальной скорости (Приложение Б – рисунок Б.2). Таким образом можно сказать, что для успешной реализации метода MASW, можно уменьшить расстояние между ПВ до 10 метров, без критичных потерь в качестве данных.

Наиболее критичным для SWT оказывается не шаг между ПВ, а насколько много донных станций необходимо разложить для получения устойчивого результата. Для того чтобы оценить эффективность системы наблюдений, была выбрана равномерная сеть наблюдений, сгущение в центре участка не включены. Получилась площадь 900х900 метров, с шагом между донными станциями 150 метров, между линиями взрыва также 150

метров. Для этой площади были взяты срез групповых скоростей, полученных по методу SWT на частоте 3 Гц, срез фазовых скоростей, полученных по методу MASW на частоте 3 Гц (рисунок 3.3.1). Сравнение по частой равномерной сети показывают, что результаты MASW и SWT соотносятся друг с другом. В северо-восточном углу наблюдается область с понижением фазовых и групповых скоростей. На всей остальной области наблюдается равномерная область с зоной повышенных скоростей, обрамляющей центральную часть. Уже на этом этапе можно сказать, что SWT дает более детальную картину.

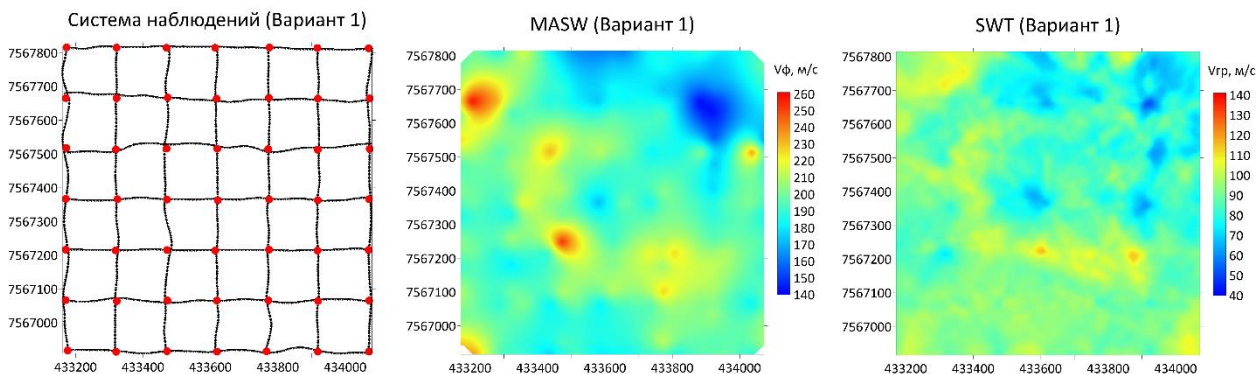


Рисунок 3.3.1 Срезы фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на частоте 3 Гц, полученные при равномерной системе наблюдений с шагом между линиями взрыва 150м (пунктирные линии), между донными станциями 150 метров (красные точки).

Во втором варианте расстановки разрядили сеть, увеличив расстояние между линиями взрыва и донными станциями до 300 метров. Рассматриваем также частоту 3 Гц (рисунок 3.3.2). На срезе MASW наблюдаем заметную потерю в детальность. Общая структура все еще заметна, но пропали некоторые области. На срезе SWT потеря в детальности практически не видна, произошло «сглаживание» результатов, из-за уменьшения количества трасс, но положение основных минимумов и максимумов на месте. На этом этапе можно сказать, что SWT ведет себя стабильно при разрежении сети.

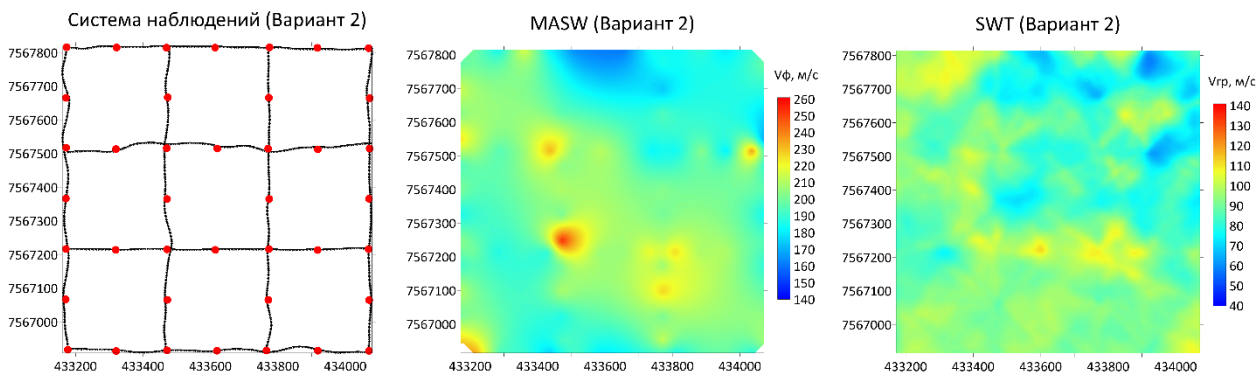


Рисунок 3.3.2 Срезы фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на частоте 3 Гц, полученные при системе наблюдений с шагом между линиями взрыва 300м (пунктирные

линии), донные станции расположены по линиям взрыва с шагом 150 метров (красные точки).

При работе с донным оборудованием, наиболее трудоемкий и ресурсоемкий является процесс раскладки и работы с донными станциями. Таким образом, чем меньше донных станций будет задействовано в работе, тем эффективнее окажется сама работа. Для данного участка наименее разреженная система раскладки донных станций представляет из себя равномерную сеть из 16 донных станций, которые расположены по периметру и внутри области с шагом 300 метров. Линии взрыва при этом расположены с шагом 150 метров (рисунок 3.3.3). На рисунке видно, что даже такая сеть позволяет не терять в детальности и отобразить все основные закономерности, с достаточной достоверностью. Подобная же система наблюдения для метода MASW, дает крайне неоднозначный вариант, на котором с трудом выделяются аномальные области.

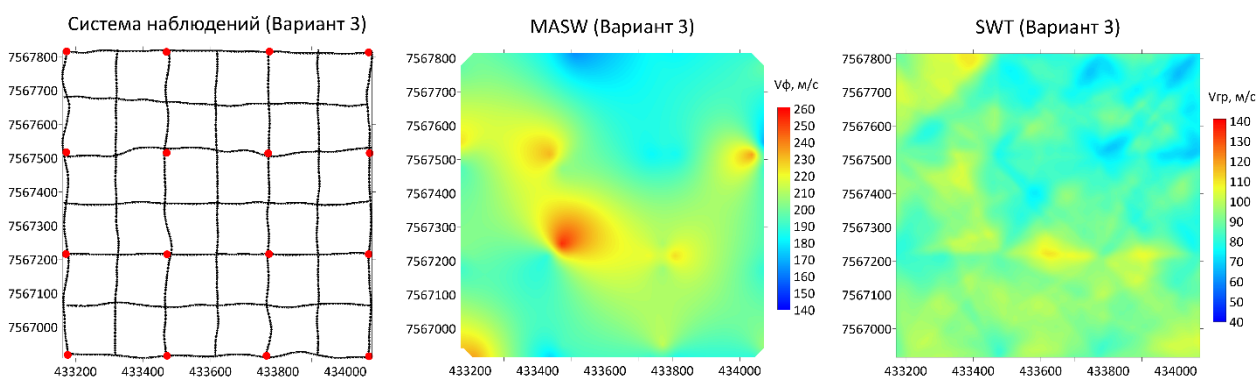


Рисунок 3.3.3 Срезы фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на частоте 3 Гц, полученные при равномерной системе наблюдений с шагом между линиями взрыва 150 м (пунктирные линии), донные станции расположены по линиям взрыва с шагом 300 метров (красные точки).

Также дополнительно была проведена проверка на устойчивость результата расчета скоростей. Для этого внутри участка был выбран квадрат размером 300 на 300 метров. В углах квадрата расставлены донные станции. Линии взрыва расположены по периметру квадрата и крестом через середину. Для сравнения использовали вырезку участка из полной области (рисунок 3.3.4). Цель проверки была отследить низкоскоростную аномалию, которая попадает северо-восточный угол исследуемого квадрата.

На рисунках отчетливо видно, что, расставив донные станции по углам участка, мы получаем удовлетворительный результат, тогда как донных станций использовалось меньше и как следствие количество лучей, пересекающих область также уменьшилось. Срез по методу MASW при этом полностью теряет свою информативность. На срезах SWT наблюдается низкоскоростная аномалия в северо-восточном углу.

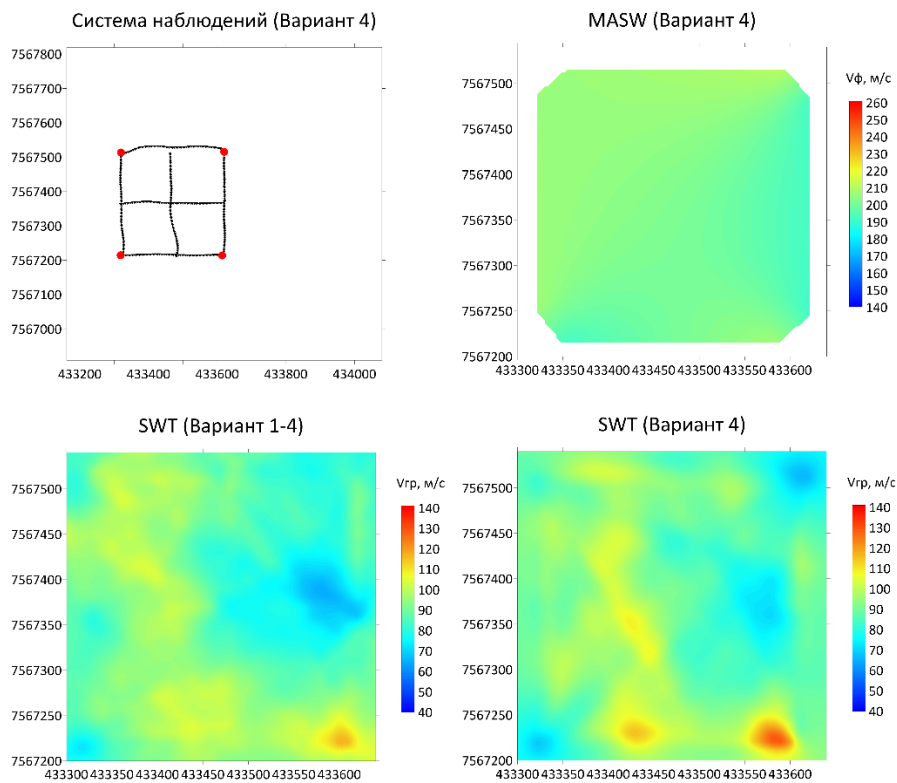


Рисунок 3.3.4 Срезы фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на частоте 3 Гц. Для квадрата 300x300 внутри участка исследования. Для сравнения представлена вырезанная область из полной картины для групповых скоростей. Донные станции (красные точки) расставлены по углам, Линии взрыва (пунктирная линия) по периметру и крестом внутри квадрата.

Для продолжения проверки, из данного квадрата был вырезан еще один квадрат со стороной 150x150 метров. В углах также расставлены донные станции, линии взрыва расположены по периметру. Для сравнения использовали вырезку участка из полной области (рисунок 3.3.5). Результат снова воспроизводится, но в данном варианте MASW также показывает нечто похожее на правду, это связано с уменьшением расстояния между точками интерполяции, но детальность все равно намного меньше, чем у групповых скоростей. Также мы продолжаем наблюдать низкоскоростную аномалию в пределах данного квадрата. В итоге можно говорить об устойчивости и воспроизводимости результата при разном наборе данных.

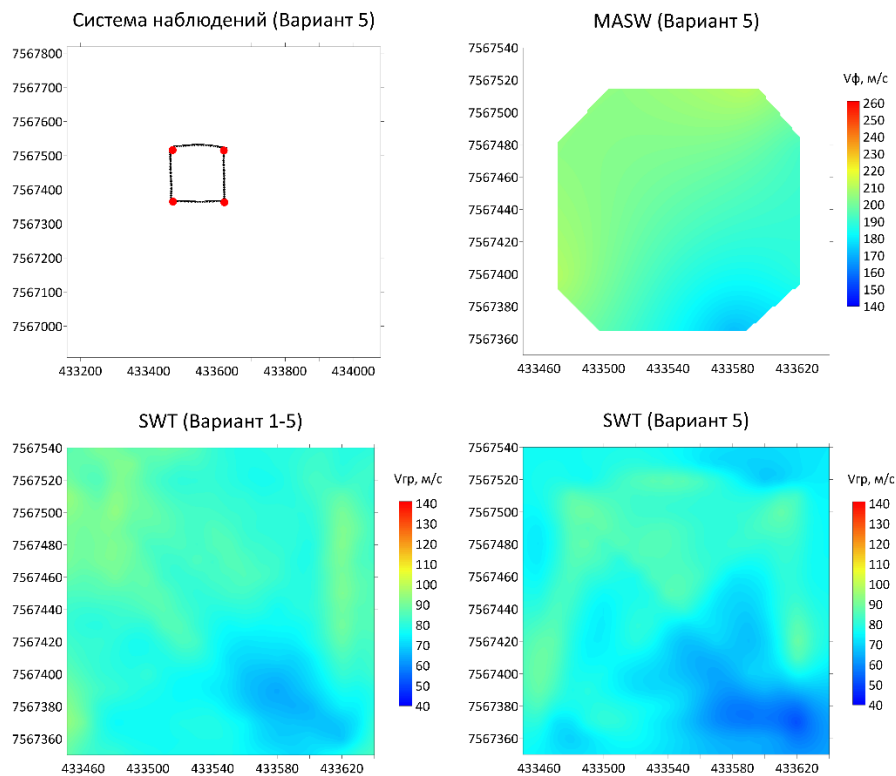


Рисунок 3.3.5 Срезы фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на частоте 3 Гц. Для квадрата 150x150 внутри участка исследования. Для сравнения представлена вырезанная область из полной картины для групповых скоростей. Донные станции (красные точки) расставлены по углам. Линии взрыва (пунктирная линия) по периметру квадрата.

3.4 Методические рекомендации по проведению работ на акваториях на поверхностных волнах

В результате проведенных тестов, можно сказать, что поверхностно-волновая томография позволяет получать устойчивый результат на всей области, даже при предельно разреженной системе наблюдений. В отличие от метода MASW, который даже при частой системе наблюдений позволял получить только данные об общей структуре территории.

Стоит отметить, что инверсия поверхностных волн не представляется возможной без наличия априорной геологической информации. Поэтому при проведении работ необходимо наличие нескольких геологических скважин. Также для наиболее качественной пикировки по методу поверхностно-волновой томографии, необходимо оценить пределы вариации групповых скоростей. Для этого равномерно по участку работ должны быть выполнены продольные профили, для того чтобы появилась возможность построить дисперсионные кривые и оценить распределение групповых и фазовых скоростей для разных частот.

Таким образом для изучения площадей с помощью поверхностных волн, размерами 1000x1000 метров рекомендуется:

- Использовать SWT как основной метод, заверочное бурение и MASW, использовать как вспомогательные методы для уточнения априорной информации и построения начальной модели для инверсии;
- Система наблюдения выбирается равномерная, донные станции должны покрывать всю площадь с шагом 250-300 метров. Максимальное расстояние между линиями взрыва не должно превышать расстояние между донными станциями, для увеличения детальности, рекомендуется расположить линии взрыва чаще;
- Шаг между взрывами может быть 10 метров, что позволит воспользоваться как MASW, так и исключить влияние соседних взрывов на больших удалениях для SWT;
- Длина записи должна позволять проследить поверхностную волну для отдельной донной станции на все удаления исследуемой области (на данных с Обской губы, была допущена ошибка, запись была обрезана до 5 мс. Это не позволило изучить весь набор удалений, для этого надо было обрезать до 15 мс);
- Обработку данных начинать с моделирование дисперсионных кривых групповой скорости для моделей, полученных по методу MASW, чтобы оценить предельные максимальные и минимальные значения групповой скорости.

ВЫВОДЫ

В рамках работы были проанализированы и обработаны площадные данные, полученные в ходе инженерно-геофизических исследований в акватории Обской губы на газовом месторождении Каменомысское море. Целевыми волнами являлись поверхностные волны Шольте. Удалось сделать следующие выводы:

- При наличии сплошного газонасыщения методы, основанные на поверхностных волнах, позволяют получить информацию о внутреннем строении участка работ, в отличие от высокочастотных методов, в которых используется электроискровой источник и буксируемые
- Для получения наилучшего результата необходимо комплексировать методики анализа поверхностных волны (MASW и SWT) и проводить совместную инверсию по групповым и фазовым скоростям;
- Поверхностно-волновая томография наилучшим образом показывает себя для эффективного проведения площадной съемки с наименьшими затратами;
- Были даны методические рекомендации для изучения площадей с помощью поверхностных волн, такие как: выбор комплекса методов, выбор оптимальной системы наблюдений, особенности обработки (длина записи, моделирование).

Сравнение эффективности методов MASW и SWT, полностью совпадает с ожидаемыми результатами, можно подвести следующий итог:

К преимуществам MASW относятся:

- Быстрота обработки данных;
- Апробированная методика расчета и анализа дисперсионных кривых.

К недостаткам MASW относятся:

- Низкая горизонтальная разрешающая способность, ограниченная либо длиной приемной расстановки, либо шагом между пунктами взрыва;
- Построение одномерных изображений среды, с последующей интерполяцией.

К преимуществам SWT относятся:

- Более высокая разрешающая способность, зависящая только от длины волны;
- Построение трехмерных скоростных изображений среды;
- Более эффективная методика обработки площадных данных (меньшее количество пунктов приема).

К недостаткам SWT относятся:

- Более трудозатратная обработка данных;
- Высокие требования к качеству входных данных;
- Необходима более высокая квалификация обработчика для выполнения пикировки аналитического сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Боганик Г.Н., Гурвич И.И. (2006) Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС. 744 с.
- Бондарь В.И. (2003). Основы Сейсморазведки. Екатеринбург: Издательство УГГА. 332 с.
- Буров, В.А., Сергеев, С.Н., Шуруп, А.С., Щербина, А.В. (2015). Томографическое восстановление характеристик дна мелкого моря. Акустический журнал, 61(5), 583-595.
- Воскресенский Ю.Н. (2010). Полевая геофизика: Учебник для вузов. Москва: ООО «Издательский дом Недра». 479 с.
- Левин И.С., Пономаренко А.В., Половков В.В., Попов Д.А., Троян В.Н. (2022). О методе поверхностно-волновой томографии и перспективах его применения в инженерной сейсморазведке. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 67(2).
- Левшин, А. Л., Яновская, Т. Б., Ландер, А. Л. (1987). Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной земле. М.: Наука, 277 с.
- Преснов, Д.А., Собисевич, А.Л., Груздев, П.Д., Игнатьев, В.И., Коньков, А.И., Мореев, А.Ю., Тарасов, А.В., Шувалов, А.А., Шуруп, А.С. (2019). Томографическая оценка параметров водоема при наличии ледового покрова с использованием сейсмоакустических излучателей. Акустический журнал, 65(5), 688-698.
- Шишкина, М.А., Фокин, И.В., Тихоцкий, С.А. (2015). К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии. Сейсмические технологии, 1, 5-21.
- Яновская, Т. Б. (2015). Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 167 с.
- Alyousuf, T., Rector, J., Newman, G., Petrov, P. (2017). Surface-wave tomography to resolve water table: Almond Orchard case study, Modesto, California. In: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. SEG, 5407–5411.
- Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G., Theilen, F. (2004). 1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion. Geophysics, 69, 330–344.
- Boiero, D., Wiarda, E., Vermeer, P. (2013). Surface-and guided-wave inversion for near-surface modeling in land and shallow marine seismic data. The Leading Edge, 32(6), 638–646.
- Cerveny, V. (2005). Seismic ray theory. Cambridge: Cambridge University Press

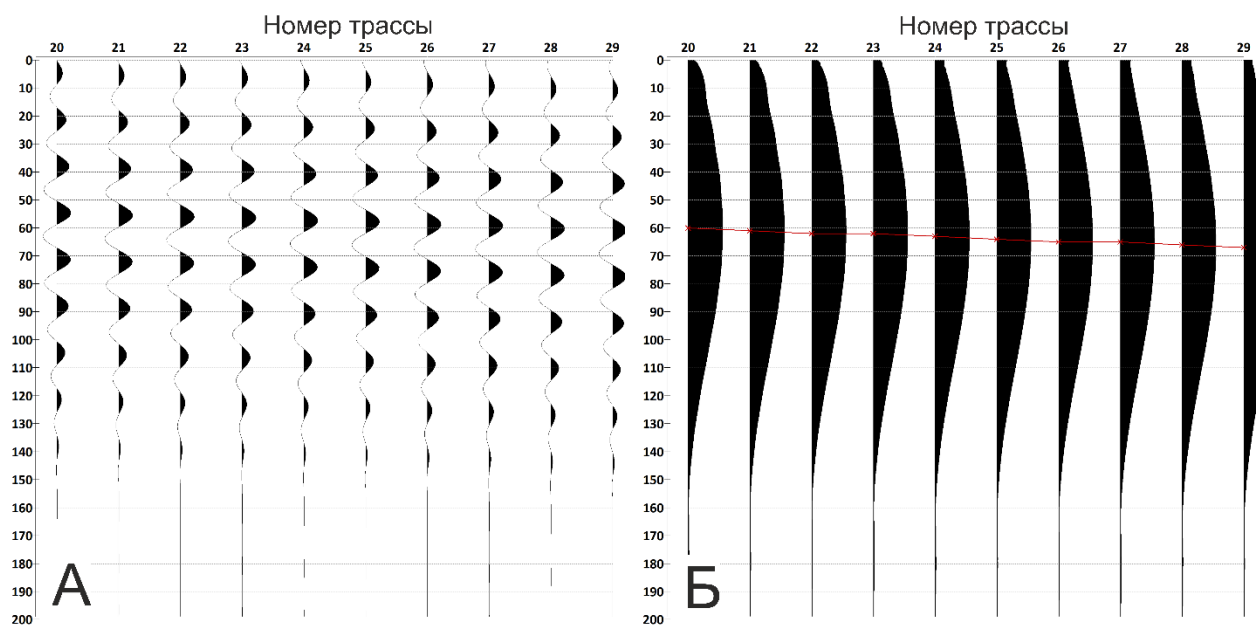
- Hisada, Y., (1994). "An Efficient Method for Computing Green's Functions for a Layered Half-Space with Sources and Receivers at Close Depths," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1456-1472.
- Ikeda, T., Tsuji, T. (2018). Surface-wave tomography for near-surface characterization with continuous wavelet transform for two-station cross-correlation. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018*. SEG, 2531–2535.
- Kaufmann, R.D., J. Xia, R.C. Benson, L.B. Yuhr, D.W. Casto, and C.B. Park, (2005). Evaluation of MASW data acquired with a hydrophone streamer in a shallow marine environment: *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, v. 10, n. 2, p. 87-98.
- Klein, G., Bohlen, T., Theilen, F., Kugler, S., Forbriger, T. (2005). Acquisition and inversion of dispersive seismic waves in shallow marine environments. *Marine Geophysical Researches*, 26, 287–315.
- Kugler, S., Bohlen, T., Forbriger, T., Bussat, S., Klein, G. (2007). Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments. *Geophysical Journal International*, 168(2), 551–570.
- Lai, C.G., (1998). "Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization," Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- Leontarakis, Konstantinos & Orfanos, Christos & Apostolopoulos, G.. (2019). Cross-Correlation Analysis of Surface Waves for Group and Phase Velocity Mapping along a 2D Seismic Profile. 1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM, Held at Near Surface Geoscience Conference and Exhibition 2019, NSG 2019.
- Lin, C.-P.; Chang, C.-C.; Chang, T.-S. (2004). The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 24, 689–698
- Long, L. T., Kocaoglu, A. H., Doll, W.E., Chen, X., Martin, J. (1999). Surface-wave group-velocity tomography for shallow structures at a waste site. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999*. SEG, 496-499.
- Long, L. T., Kocaoglu, A. H. (2001). Surface-Wave Group-Velocity Tomography for Shallow Structures. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics (JEEG)*, 6(2), 71–81.
- Long, M.; Trafford, A.; McGrath, T.; O'Connor, P. (2020). Multichannel analysis of surface waves (MASW) for offshore geotechnical investigations. *Eng. Geol.*, 272, 105649.
- Paoletti, L.; Mouton, E.; Liposcak, I (2013). Comparison of underwater MASW, seismic CPT and downhole methods offshore Croatia. In *Proceedings of the 4th International*

Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation (ISC'4), Recife, Brazil; Coutinho, R.Q., Mayne, P.W., Eds.; pp. 1457–1462.

- Park C., Miller R., Xia J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park C., Miller R., Xia J. (1999). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.
- Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J.; Ivanov, J.; Sonnichsen, G.V.; Hunter, J.A.; Good, R.L.; Burns, R.A.; Christian, H (2005). Underwater MASW to evaluate stiffness of water-bottom sediments. *Lead. Edge*, 24, 724–728.
- Polovkov, V. V., Nikitin, A. S., Popov, D. A., Maev, P. A., Birukov, E. A., & Tokarev, M. Y. (2018). Gas-saturated sediments study in the upper part of the geological medium using ocean bottom nodes. In: *Engineering and Mining Geophysics 2018*. EAGE, 1-5.
- Ponomarenko, A., Polovkov, V., Popov, D., & Kashtan, B. (2019, April). The Advantages of Using Surface Wave Tomography in the Marine Studies of the Upper Part of the Seismic Section. In: *Marine Technologies 2019*. EAGE, 1-7.
- Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S. (2016). Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves. *Physics of Wave Phenomena*, 24(3), 249-254.
- Puech, A.; Rivoallan, X.; Cherel, L (2004). The Use of Surface Waves in the Characterisation of Seabed Sediments: Development of a MASW System for Offshore Applications. In *Caractérisation In Situ Des Fonds Marins; SEATECH WEEK: Brest, France*.
- Rector, J. W., Pfeiffe, J., Hodges, S., Kingman, J., Sprott, E. (2015). Tomographic imaging of surface waves: A case study from the Phoenix Mine, Battle Mountain, Nevada. *The Leading Edge*, 34(11), 1360–1364.
- Roslov, Y. V., Merezko, A. A., Polovkov, V. V., Popov, D. A., & Zhemchuzhnikov, E. G. (2014). Multicomponent seismic survey in transition zone of Pechora Bay with node system Turtle-500. In: *6th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition*. EAGE, 1-5.
- Ryzhkov, V. I., Sergeev, K. S., Roslov, Y. V., Polovkov, V. V., & Elistratov, A. V. (2015). Engineering surveys by the method of the cableless ocean bottom seismic. In: *11th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics*, EAGE.
- Socco, L., Foti, S. and Boiero, D. (2010). Surface-wave analysis for building near-surface velocity models - established approaches and new perspectives. *Geophysics*, 75(5), 75A83–75A102.

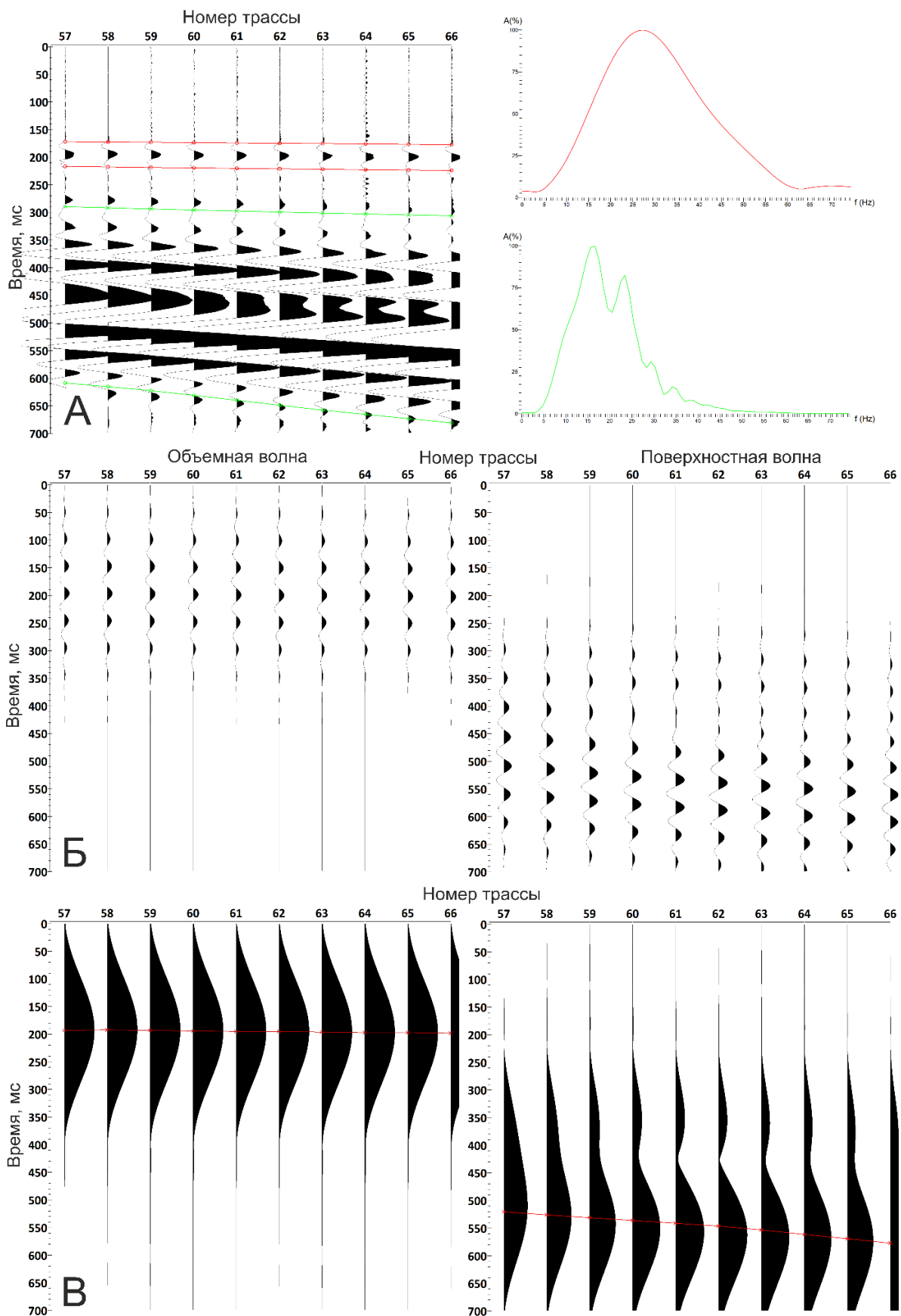
- Suto, K, 2007, Multichannel analysis of surface waves (MASW) for investigation of ground competence: an introduction, in “Engineering Advances in Earthworks”, Proceedings of the Sydney Chapter 2007 Symposium, Australian Geomechanics Society , p. 71-81
- Xiaofei Chen (1993). 'A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space', GJI
- Yanovskaya, T. B., Ditmar, P. G. (1990). Smoothness criteria in surface wave tomography. Geophysical Journal International, 102(1), 63–72.
- Полевой отчет инженерных изысканий на морские участки по объекту «Обустройство газового месторождения Каменномысское-море». М., ООО «СПЛИТ», 2020.

Приложение А. Тестирование влияние фильтрации на аналитический сигнал.



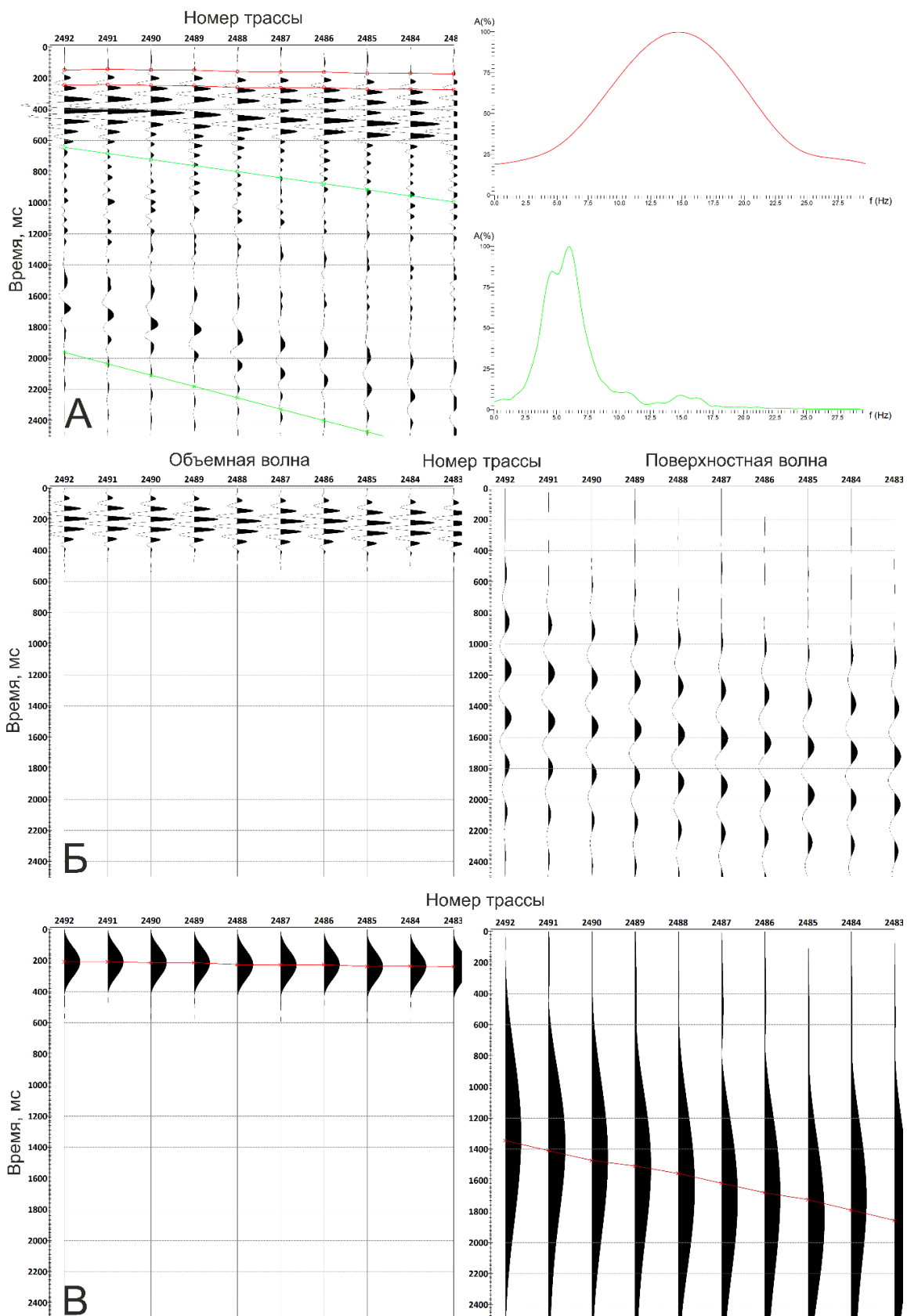
Приложение А – Рисунок А.1.

Тест №1. А) Сейсмограмма отраженной волны после узкополосной фильтрации на доминирующей частоте 60 Гц; Б) Аналитический сигнал на частоте 60 Гц, красная линия показывает положение максимумов.



Приложение А – Рисунок А.2.

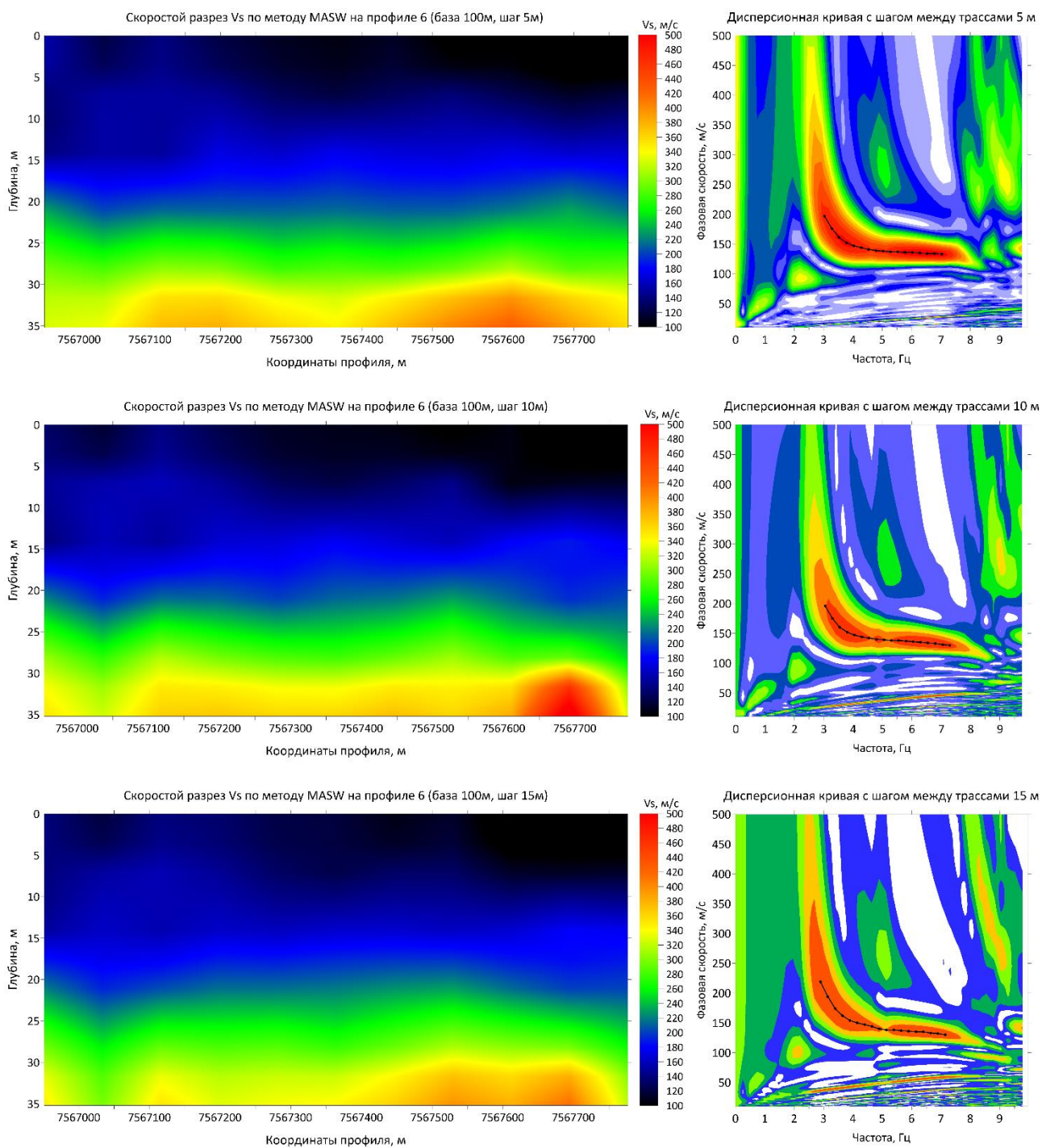
Тест №2. А) Исходные сейсмограммы и спектры от тестируемых волн; Б) Данные после узкополосной фильтрации, доминирующая частота 20 Гц; В) Аналитический сигнал, красными линиями показаны отпикерованные максимумы.



Приложение А - Рисунок А.3.

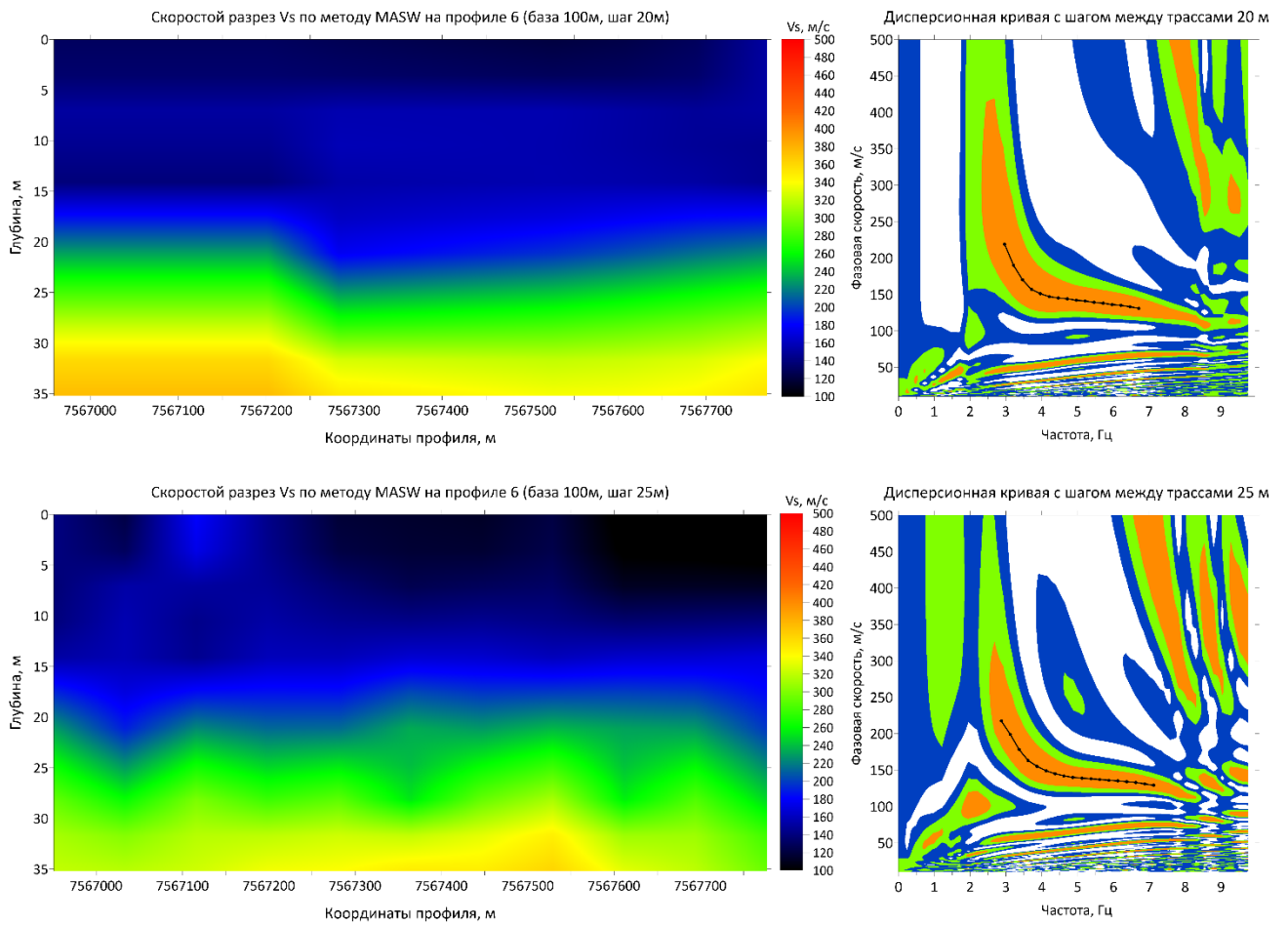
Тест №3. А) Исходные сейсмограммы и спектры от тестируемых волн; Б) Данные после узкополосной фильтрации; В) Аналитический сигнал, красными линиями показаны отпикерованные максимумы.

Приложение Б. Оптимизация системы наблюдений для площадных исследований.



Приложение Б - Рисунок Б.2.

Скоростные разрезы Vs, по методу MASW на профиле 6 с разным шагом между трассами (5, 10, 15 метров) на базе 100 метров. Примеры дисперсионной кривой для каждого профиля.



Приложение Б - Рисунок Б.2.

Скоростные разрезы Vs, по методу MASW на профиле 6 с разным шагом между трассами (20, 25 метров) на базе 100 метров. Примеры дисперсионной кривой для каждого профиля.