

***КУДИНОВ Артем Анатольевич***

**Выпускная квалификационная работа**

***Методика проведения инженерно-геофизических исследований с применением донного сейсмического оборудования в условиях газонасыщенных грунтов на примере обустройства газового месторождения Каменномыское-море***

Магистратура:  
Направление 05.04.01 «Геология»  
Основная образовательная программа ВМ.5796 «Геофизика»

Научный руководитель:  
Институт наук о Земле,  
кафедра геофизики, к.г.-м.н.,  
доцент, Половков Вячеслав  
Владимирович

Рецензент: начальник отдела  
полевых работ, общество с  
ограниченной  
ответственностью «СПЛИТ»,  
Потемка Андрей  
Константинович

Санкт-Петербург

2021

## АННОТАЦИЯ

Данная работа посвящена разработке технологии проведения инженерно-геофизических работ на акваториях с использованием донных систем регистрации. Целью является оценка эффективности применения донных сейсмических регистраторов при проведении инженерно-геофизических исследований на акваториях в условиях газонасыщенных грунтов в верхней части разреза. Предложена и апробирована методика обработки преломленных волн по «вторым» вступлениям на реальных материалах с газового месторождения Каменномысское-море. Материалы обрабатывались с помощью метода сейсмической томографии, метода  $t_0$  и MASW.

Объем работы составляет 53 страницы, 48 иллюстраций, 2 таблицы. Работа разделена на 3 главы. При написании использовалось 24 источника информации.

## ABSTRACT

This work is dedicated to the development of technology of near-surface exploration in water areas using OBS. The objective is to evaluate the effectiveness of the OBN during the near-surface exploration in water areas in gas-saturated soil conditions in the upper section. A technique of processing refracted waves by "second" arrivals on real materials from the Kamennomyskoye-more gas field has been proposed and tested. The materials were processed using the seismic tomography,  $t_0$  method and MASW.

Work contains 53 pages, 48 illustrations, 2 tables. Work is divided into 3 chapters.

## СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений.....	5
Введение.....	6
1 Целесообразность использования донных систем регистрации при изучении верхней части разреза.....	9
1.1 Недостатки стандартного комплекса сейсмоакустических методов при изучении верхней части разреза.....	9
1.2 Возможные методы обработки сейсмических данных, зарегистрированных донными регистраторами .....	9
1.2.1 Теоретические основы метода $t_0$ .....	10
1.2.2 Теоретические основы метода сейсмической томографии .....	13
1.2.3 Теоретические основы метода MASW .....	18
1.3 Предлагаемая методика работ с донными станциями .....	21
2 Проведение инженерно-геофизических исследований на акватории Обской губы.....	23
2.1 Методика и технология работ .....	23
2.2 Анализ исходных сейсмических данных .....	28
2.3 Проверка гипотезы использования «вторых» вступлений преломленных волн.....	32
2.4 Обработка данных МПВ .....	41
2.5 MASW.....	42
2.6 3D сейсмическая томография.....	43
3 Оценка информативности полученных данных и эффективности используемой системы наблюдений.....	45
3.1 Сравнение полученных результатов с данными со скважин и с результатами НСАП.....	45
3.2 Проверка избыточности системы наблюдения.....	46
Заключение .....	51
Список литературы .....	52

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЧХ	Амплитудно-частотная характеристика
ВЧ НСП	Высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование
ВЧР	Верхняя часть разреза
ГЛБО	Гидролокатор бокового обзора
ЛСП	Ледостойкая платформа
ММП	Многолетнемерзлые породы
МПВ	Метод преломленных волн
ООО	Общество с ограниченной ответственностью
ОПВ	Общий пункт взрыва
ОПП	Общий пункт приема
ПВ	Пункт взрыва
ПП	Пункт приема
РФ	Российская Федерация
ССВР	Сейсморазведка сверхвысокого разрешения
Т/х	Теплоход
ЯНАО	Ямало-Ненецкий автономный округ
MASW	Multichannel analysis of surface waves, многоканальный анализ поверхностных волн

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время освоение месторождений нефти и газа на акваториях начинается с изучения ВЧР. Такие исследования выполняются при помощи стандартного комплекса сейсмоакустических исследований. Данные работы, несмотря на свою эффективность, имеют ряд недостатков. В частности, не представляется возможным получить детальную информацию о самих газонасыщенных осадках. Такие осадки являются индикатором зон разгрузки углеводородов из недр осадочного чехла, представляют одну из основных геологических опасностей, связанных с верхней частью разреза (вливают на реологические свойства грунтов и усиливают их склонность к разжижению), а также приводят к затуханию сигнала, что затрудняет изучение подстилающих отложений и физических свойств вмещающих грунтов (Токарев и др., 2019).

Знание о газонасыщенных осадках преследует не только научные цели (изучение климатических изменений), но также и практические (поиск залежей углеводородов; оценка экологического состояния акваторий), в частности, выделение опасных геологических процессов и выбор места установки буровых платформ и безопасного расположения скважин, прокладки подводных трубопроводов различного назначения, установки инженерных сооружений на морское дно, и т.д. Такая информация наиболее актуальна для организаций, занимающихся обустройством морских месторождений нефти и газа и строительством инфраструктуры на шельфе (Токарев и др., 2019).

В целях изучения ВЧР на акваториях в условиях газонасыщенных грунтов целесообразно искать иные подходы к выполнению исследований отличных от традиционных методов морской сейсморазведки. Предлагаемым решением является использование донного сейсмического оборудования. Таким образом, настоящая выпускная квалификационная работа посвящена разработке методики проведения инженерно-геофизических исследований на акваториях в условиях газонасыщенных грунтов с применением донных систем регистрации. Такая разрабатывается Санкт-Петербургским государственным университетом совместно с ООО «Центр комплексных морских исследований СПбГУ» и ООО «СПЛИТ».

Целью данной работы является оценка эффективности применения донных сейсмических регистраторов при проведении инженерно-геофизических исследований на акваториях в условиях газонасыщенных грунтов в верхней части разреза.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- а) Изучение литературы по теме исследования;
- б) Изучение особенностей волнового поля, формируемого при исследовании объектов, расположенных на глубинах, не превышающих длину волны, с использованием математического моделирования;
- в) Обработка реальных сейсмических данных с использованием различных подходов (MASW, метод  $t_0$ , 2D/3D томография) и последующий анализ полученных результатов;
- г) Оценка избыточности применяемой системы наблюдений с учетом разрешающей способности используемых методов;
- д) Разработка рекомендаций по проведению инженерно-геофизических работ с использованием донных систем регистрации.

В качестве апробирования предлагаемой методики выполнялась обработка сейсмических материалов, полученных в ходе инженерных изысканий на акватории газового месторождения Каменномысское-море.

Выполнение выпускной квалификационной работы выполнялось с привлечением ряда специализированных программ:

- а) ArcGIS (v.10.8) (<https://www.esri.com/>);
- б) GeoTomo (v.2012) с применением пакета TomoPlus (v.5.4) (<https://geotomo.com/>);
- в) RadExPro (v.2018.2) (<https://radexpro.com/>);
- г) Surfer (v.20.1.195) (<https://www.goldensoftware.com/>);
- д) Tesserat 2D (v.7.2.8) (<http://www.tesserat-geo.com/>);
- е) Voxler (v.4.6.913) (<https://www.goldensoftware.com/>);
- ж) XТomo-LM (v3.4.1) (<http://www.xgeo.ru/>).

Апробирование выпускной квалификационной работы выполнялось на:

- а) «Геологическом Международном Студенческом Саммите» с докладом «Инженерно-геофизические исследования с применением донного сейсмического оборудования в условиях газонасыщенных грунтов на примере обустройства газового месторождения Каменномысское-море» (СПб, 26-28 марта 2021 г.);
- б) XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» с докладом «Методика проведения инженерно-геофизических исследований с применением

донного сейсмического оборудования в условиях газонасыщенных грунтов» (СПб, 12-16 апреля 2021 г.);

- в) 3-ей научно-практической конференции и выставке «Морские Технологии 2021» в качестве соавтора доклада «Сейсмические наблюдения с донным оборудованием для решения задач инженерных геологических изысканий на предельном мелководье» (Геленджик, 26-30 апреля 2021 г.).

Выражается благодарность научному руководителю Половкову Вячеславу Владимировичу за неоценимый вклад в написании настоящей выпускной квалификационной работы, Киброеву Илье Сергеевичу за помощь в обработке полевых материалов, компании ООО «СПЛИТ» в лице Потемки Андрея Константиновича и Пронина Ильи Сергеевича за предоставленные полевые материалы с месторождения Каменномысское-море.

# 1 ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОННЫХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА

## 1.1 Недостатки стандартного комплекса сейсмоакустических методов при изучении верхней части разреза

В настоящее время стандартным комплексом геофизических исследований на акваториях является НСАП и ССВР с буксируемыми косами. Несмотря на высокую эффективность данных методов в изучении ВЧР, они имеют ряд недостатков. Прежде всего проводится возбуждение и регистрация только продольных волн. Сведения о скоростях поперечных волн оказываются недоступными, что не дает возможности оценки физико-механических свойств грунтов. Также наличие газонасыщенных осадков в ВЧР приводит к затуханию полезного сигнала (рис. 1.1.1). При этом на сейсмических записях газонасыщенные области приводят к существенным изменениям геометрии границ, различным дифракционным эффектам, а также экранированию нижележащего разреза (Polovkov et al., 2018).

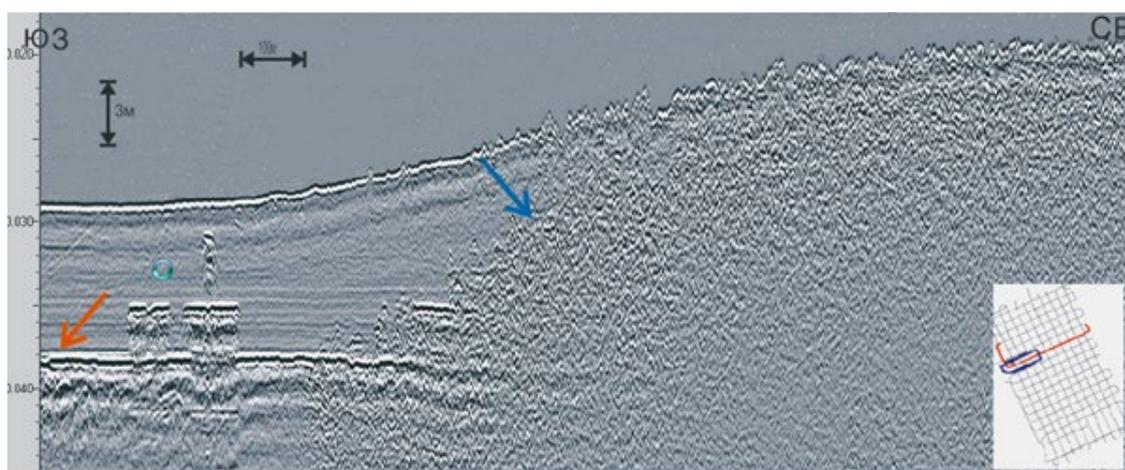


Рисунок 1.1.1 Фрагмент суммарного разреза метода ССВР в северной части Обской губы (SplitMultiSeis 16 каналов, 700-1000 Гц). Синей стрелкой указана область с наличием газонасыщенных грунтов, красной – без наличия таких грунтов

## 1.2 Возможные методы обработки сейсмических данных, зарегистрированных донными регистраторами

На рисунке 2.2.3 представлена типовая сейсмограмма, полученная в ходе инженерно-геофизических исследований на акватории (информация о методике и

технологии проведенных работ указана в п.2.1). На волновой картине выделяются волны различных типов, в частности, прямая волна, преломленная волна и поверхностная волна Шольте. Наличие данных волн создаёт предпосылку к обработке сейсмических данных комплексом методов:

- 1) Обработка данных МПВ способом  $t_0$ ;
- 2) Обработка данных МПВ способом 2D сейсмотомографии;
- 3) Обработка поверхностных волн Шольте методом MASW.

### 1.2.1 Теоретические основы метода $t_0$

Способ  $t_0$  – приближённый, применяемый в методе средних скоростей, когда покрывающая толща характеризуется постоянной средней скоростью  $V_{cp}$ . Условия применимости способа следующие (Гурвич, Боганик, 1980):

- а) Радиус кривизны преломляющей границы значительно больше глубины её залегания;
- б) Граничная скорость изменяется плавно вдоль линии наблюдения;
- в) Проницание в преломляющий слой отсутствует;
- г) Среда рассматривается как горизонтально-слоистая с увеличивающейся скоростью с глубиной.

Рассмотрим встречные годографы  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , соответствующие пунктам возбуждения  $O_1$  и  $O_2$  и увязанные между собой во взаимных точках на времени  $T$  (рис. 1.2.1.1а). Времена прихода  $t_1$  и  $t_2$  преломленной волны в произвольную точку наблюдения  $S(x)$  определяются соотношениями

$$t_1 = t_{O_1AB} + t_{BS}, \quad t_2 = t_{O_2ED} + t_{DS}, \quad T = t_{O_1AB} + t_{BD} + t_{O_2ED}, \quad (1.2.1.1)$$

откуда

$$t_1 + t_2 - T = t_{BS} + t_{DS} - t_{BD}. \quad (1.2.1.2)$$

Опустим из точки  $S$  перпендикуляр  $SC$  длиной  $h$  на границу  $R$ . Принимая во внимание сделанные допущения, считаем  $SBD$  равнобедренным треугольником, из чего следует:

$$t_{BS} = t_{DS} = \frac{h}{V_{cp} \cos i}, \quad t_{BD} = 2t_{DC} = \frac{2h \tan i}{V_{gp}} = \frac{2h \sin^2 i}{V_{cp} \cos i}. \quad (1.2.1.3)$$

Учитывая (1.2.1.2), имеем:

$$t_1 + t_2 - T = \frac{2h \cos i}{V_{cp}} = t_0. \quad (1.2.1.4)$$

Следовательно, если в точке  $S(x)$  известны времена  $t_1$  и  $t_2$  по встречным годографам, а также взаимное время  $T$ , то для неё можно вычислить время  $t_0$ . Эхоглубина  $h$  до преломляющей границы равна:

$$h = kt_0 = k(t_1 + t_2 - T), \quad k = \frac{V_{cp}}{2 \cos i} = \frac{V_{cp} V_{гр}}{2 \sqrt{V_{гр}^2 - V_{cp}^2}}. \quad (1.2.1.5)$$

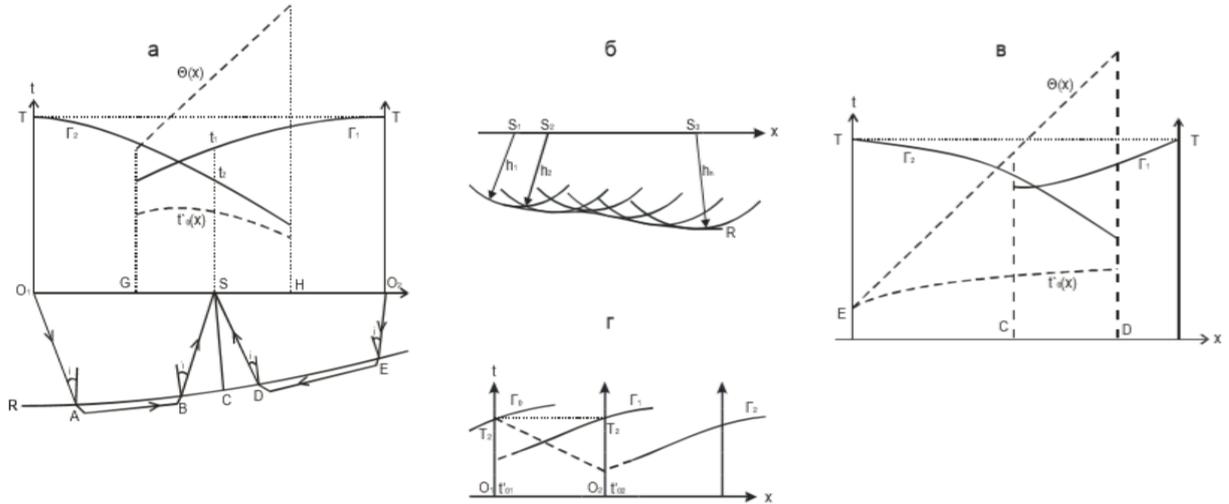


Рисунок 1.2.1.1 Построение преломляющей границы способом  $t_0$ : а – лучевая схема и годографы; б – построение границы по эхо-глубинам; в – экстраполяция разностного годографа; г – построение границы по нагоняющим годографам (Гурвич, Боганик, 1980)

Чтобы вычислить коэффициент  $k$ , следует предварительно определить граничную скорость. Для этого составим разностный годограф  $\theta(x)$ :

$$\theta(x) = t_1 - t_2 + T. \quad (1.2.1.6)$$

Его угловой коэффициент  $\Delta\theta/\Delta x$  с учетом приближенного годографа отраженной волны в параболической форме ( $t(x) \approx t_0 + \frac{x^2}{v^2}$  (1.2.1.7)) для кажущихся скоростей выразим так:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta x} = \frac{1}{v_{k1}} + \frac{1}{v_{k2}} = \frac{\sin(i + \varphi)}{v_{cp}} + \frac{\sin(i - \varphi)}{v_{cp}} = \frac{2 \cos \varphi}{v_{гр}}. \quad (1.2.1.8)$$

Отсюда можно определить граничную скорость  $V_{гр}$ . Обычно пользуются приближенной формулой, строго справедливой для горизонтальной границы:

$$v_{гр} = 2 \frac{\Delta x}{\Delta \theta}. \quad (1.2.1.9)$$

При изменении граничной скорости вдоль профиля разностный годограф становится криволинейным, и скорость  $V_{гр}$  следует вычислять по угловому коэффициенту касательной к нему. В этом случае коэффициент  $k$  является функцией от  $x$ .

Кривые  $t_0(x)$  и  $\theta(x)$  строят одновременно: для всякой точки наблюдения  $S(x)$ , где даны времена встречных годографов, по их графикам находят разность  $\Delta t(x) = T - t_2(x)$  и откладывают эту величину вверх и вниз от значения  $t_1(x)$  в той же точке. Очевидно, что  $t_1(x) + \Delta t(x) = \theta(x)$  и  $t_1(x) - \Delta t(x) = t_0$  (Гурвич, Боганик, 1980).

Сопоставляя уравнения (1.2.1.4) и (1.2.1.6), получаем следующие соотношения:

$$t_1(x) = \frac{t_0(x) + \theta(x)}{2}, \quad t_2(x) = \frac{\theta(x) - t_0(x)}{2} + T. \quad (1.2.1.10)$$

При некоторых допущениях их можно использовать для обработки одиночных или нагоняющих годографов. Пусть на участке профиля СЕ годограф  $\Gamma_2$  не имеет встречного годографа (рис. 1.2.1.1в). Построим разностный годограф  $\theta(x)$  на участке CD, где встречный годограф имеется. Предположив, что граничная скорость постоянная, продлим разностный годограф  $\theta(x)$  на участок СЕ. Имея здесь значения  $\theta(x)$  разностного годографа и значения  $t_2(x)$  годографа  $\Gamma_2$ , можно построить, согласно уравнениям (1.2.1.10), линию  $t_0(x)$  и соответствующую ей преломляющую границу (Гурвич, Боганик, 1980).

Пусть имеется система нагоняющих годографов  $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$ , полученных при источниках  $O_0, O_1, O_2$  (рис. 1.2.1.1г). Используя свойство подобия формы нагоняющих годографов, составим сводные годографы  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . По ним можно определить времена  $t_{01}(x)$  и  $t_{02}(x)$  на ПВ  $O_1$  и  $O_2$ . Если время, определённое в точке  $O_2$  по годографу  $\Gamma_1$ , равно  $T_2$ , то согласно принципу взаимности это же время можно было бы наблюдать в точке  $O_1$  при ПВ  $O_2$ . Следовательно, в точке  $O_1$  определены времена  $t_{01}(x)$  и  $T_2$  по прямому и встречному годографам. Кроме того, в точке  $O_2$  определены аналогичные времена  $t_{02}(x)$  и  $T_2$ . Значит, в этих взаимных точках могут быть вычислены значения  $\theta_1$  и  $\theta_2$  разностного годографа  $\theta(x)$ . Если граничная скорость на участке профиля  $O_1O_2$  постоянна, то разностный годограф есть прямая, которую можно построить по точкам  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . По значениям разностного  $\theta(x)$  и прямого  $t_1(x)$  годографов, пользуясь формулами (1.2.1.10), можно построить годограф  $t_0(x)$ , который определяет положение преломляющей границы (Гурвич, Боганик, 1980).

Вычислив по формуле (1.2.1.5) эхо-глубины  $h_1, h_2, \dots, h_n$  в ряде точек  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , строится преломляющая граница R как огибающая семейства окружностей, проведённых из этих точек соответствующими радиусами (рис. 1.2.1.1б).

## 1.2.2 Теоретические основы метода сейсмической томографии

Томография – восстановление изображения объекта по его лучевым проекциям. Проекцией является функционал физической характеристики среды. В случае сейсмической томографии на основе первых вступлений характеристикой среды является скорость сейсмических волн, а проекцией – их времена пробега.

Задача сейсмической томографии заключается в восстановлении скоростных распределений  $v(r)$  по набору времен пробега  $t_i$  сейсмических волн, которые связаны между собой функционалом Ферма (Яновская, Порохова, 2004):

$$t_i = \int_{L_i} \frac{1}{v(r)} ds, \quad (1.2.2.1)$$

где  $L_i$  - контур интегрирования, соответствующий траектории сейсмического луча.

Поскольку в (1.2.2.1) траектория луча  $L_i$  зависит от распределения скорости  $v(r)$ , то задача сейсмической томографии (1.2.2.1) является нелинейной. Для линеаризации задачи определяют не само значение скорости  $v(r)$ , а поправку  $\delta v(r)$  к некоторому заранее выбранному приближению начальной модели среды  $v_0(r)$ . При этом в алгоритм решения задачи вводится безразмерная функция  $m(r)$ :

$$|m(r)| = \left| \left( \frac{1}{v(r)} - \frac{1}{v_0(r)} \right) / \frac{1}{v_0(r)} \right| \ll 1. \quad (1.2.2.2)$$

Поправка  $\delta v(r)$  должна быть достаточно малой, так как только в этом случае изменение времени пробега луча в первую очередь будет определяться величиной  $\delta v(r)$ , а не изменением траектории сейсмического луча. Тогда временные невязки  $\Delta t$  между рассчитанными годографами при начальной модели  $v_0(r)$  и реальными годографами можно записать в виде:

$$\Delta t = \int_{L_{oi}} \frac{m}{v_0(r)} ds. \quad (1.2.2.3)$$

Для дискретной области из  $k$  ячеек интеграл (1.2.2.3) можно записать в форме матричного уравнения:

$$T = G \cdot m, \quad (1.2.2.4)$$

где  $T$  – вектор невязок  $\{\Delta t\}$ ,  $G$  – матрица  $\left[ \frac{\Delta s_{ki}}{v_{oi}} \right]$ , формирующаяся при трассировании лучей в соответствии с начальной моделью,  $m$  - искомый вектор  $\{m_k\}$ .

Для обеспечения существования и единственности решения уравнения (1.2.2.4) на это решение накладывается необходимость минимизировать левую и правую части уравнения (1.2.2.4), а также накладывается ограничение о максимальной гладкости решения. Для этого вводится квадратичная форма  $E$  величины невязки левой и правой частей (1.2.2.4) и нормы различия решений  $\Delta_{m_{ki}}$  в соседних ячейках:  $\sum_{k,j} \delta_{kj} (m_k - m_j)^2$ . В матрично-векторной форме:

$$E = \alpha \cdot m_t \cdot D \cdot m + (G \cdot m - T)_t \cdot (G \cdot m - T), \quad (1.2.2.5)$$

где  $\alpha$  - параметр регуляризации, определяющий вес нормы различий  $\Delta_{m_{ki}}$  в общей сумме  $E$ ,  $D = \delta_{kj} - \delta_{jj}$ .

Таким образом, решение находится как минимизирующее квадратичную форму  $E$ , т. е.  $\partial/\partial m_t E = 0$ . После дифференциации получается основное матричное уравнение алгоритма томографии:

$$(\alpha \cdot D + G_t \cdot G) \cdot m = G_t \cdot T. \quad (1.2.2.6)$$

Решение матричного уравнения (1.2.2.6) реализуется методом сопряженных градиентов (Гилл и др., 1985) или другими разработанными для этого математическими методами.

Следует отметить, что при решении обратной задачи параметр регуляризации  $\alpha$  имеет большое значение. Из уравнения (1.2.2.6) видно, что с уменьшением  $\alpha$  преобладающей целью решения обратной задачи будет минимизация нормы отклонений времен, при этом отклонения по скорости в соседних ячейках могут быть сколь угодно большими. Отсюда следует, что чем больше  $\alpha$ , тем меньше шум входных данных будет влиять на решение. Кроме того, при решении обратной задачи с помощью уравнения (1.2.2.6) есть возможность регулировать степень изменения скоростей в среде в зависимости от направления. Регулировка выполняется с помощью специального коэффициента  $\beta$ . Если  $\beta = 1$ , то алгоритм решения обратной задачи предоставляет возможность равного изменения свойств искомой функции и в вертикальном, и в горизонтальном направлении. Если  $\beta > 1$ , то возможность изменения свойств скоростного распределения по горизонтали подавляется по сравнению с вертикальным направлением. Если  $\beta < 1$ , то подразумевается, что скорость в основном меняется по горизонтали, а не по вертикали.

С точки зрения геофизика-обработчика, выполняющего сейсмическую томографию в любом индустриальном пакете, определение скоростей в среде с помощью сейсмической томографии выполняется в несколько этапов:

- а) Определение времен прихода первых вступлений по зарегистрированному волновому полю (считывание времен вступлений);
- б) Определение начальной скоростной модели;
- в) Решение прямой задачи и последующее решение обратной задачи, то есть решение уравнения (1.2.2.6).
- г) Повторение шага №3 до тех пор, пока среднеквадратическая разница между годографами первых вступлений и расчетными годографами не сравняется с ошибкой измерений  $\varepsilon$ .

Таким образом, процесс выполнения сейсмической томографии итерационный и сводится к реализации схемы, изображенной на рисунке 1.2.2.1.



Рисунок 1.2.2.1 Граф выполнения сейсмической томографии

Для начальной скоростной модели, заданной по априорным данным, рассчитываются годографы первых вступлений (среда при этом рассматривается как градиентная, а первые вступления – как годограф единой рефрагированной волны) и анализируется невязка (рис. 1.2.2.2). После этого решается обратная задача с задаваемым пользователем параметром регуляризации  $\alpha$  и коэффициентом  $\beta$ . Для уточненной модели снова рассчитываются годографы первых вступлений, анализируется невязка, затем снова решается обратная задача (параметр  $\alpha$  и коэффициент  $\beta$  при это может быть уменьшен, в зависимости от качества входных данных) и так далее, пока разница между годографами первых вступлений и расчетными годографами не сравняется с ошибкой измерений (рис. 1.2.2.3).

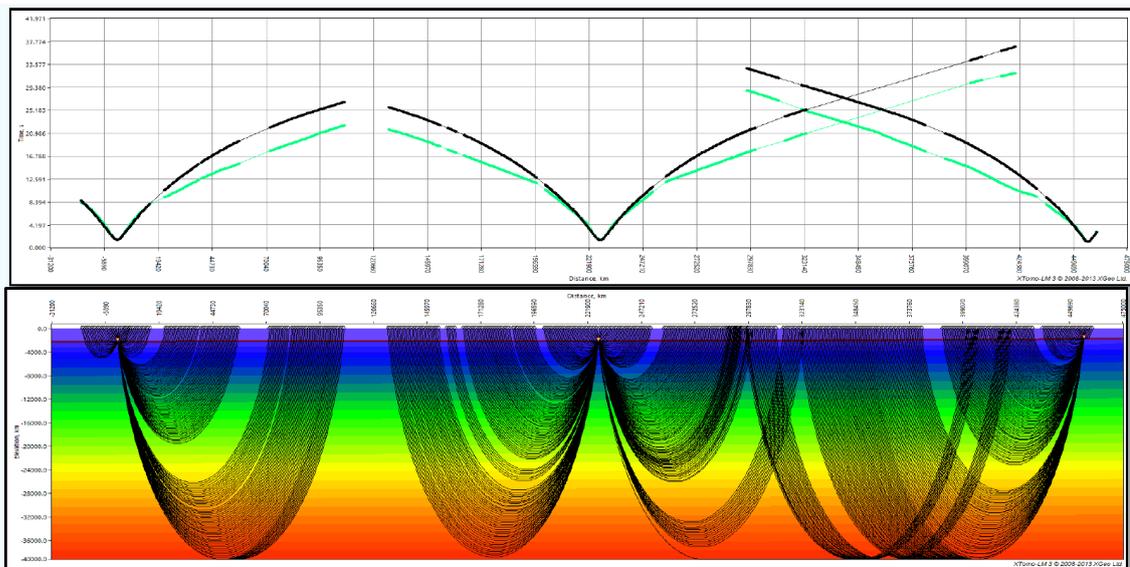


Рисунок 1.2.2.2 Сейсмическая томография на основе первых вступлений: внизу – начальная скоростная модель (черным цветом показаны лучи рефрагированных волн);  
вверху – зарегистрированные годографы первых вступлений (зеленый цвет) и  
рассчитанные годографы первых вступлений (черный цвет) (Половков, 2012)

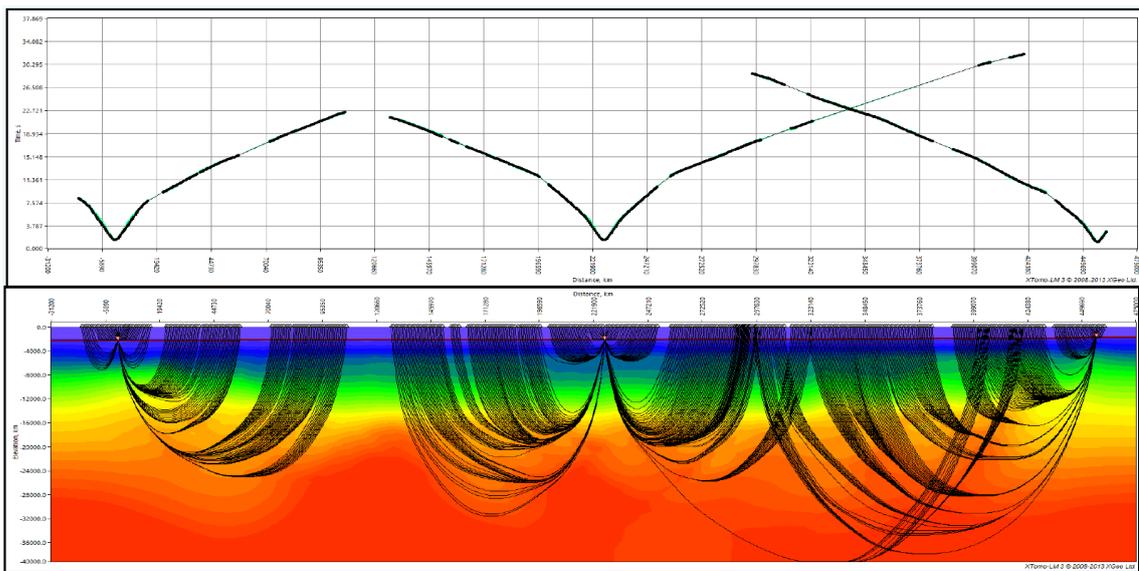


Рисунок 1.2.2.3 Сейсмическая томография на основе первых вступлений: внизу –  
итоговая скоростная модель (черным цветом показаны лучи рефрагированных волн);  
вверху – зарегистрированные годографы первых вступлений (зеленый цвет) и  
рассчитанные годографы первых вступлений (черный цвет) (Половков, 2012)

Полученные разрезы отображают распределение скоростей сейсмических волн в среде. Их можно использовать для комплексной интерпретации геофизических данных следующим образом:

- а) Геометрия изолиний скоростей, как правило, повторяет конфигурацию сейсмических границ в среде (рис. 1.2.2.4) поэтому их можно

использовать для интерполяции между скважинами и экстраполяции в области, находящиеся за пределами скважин.

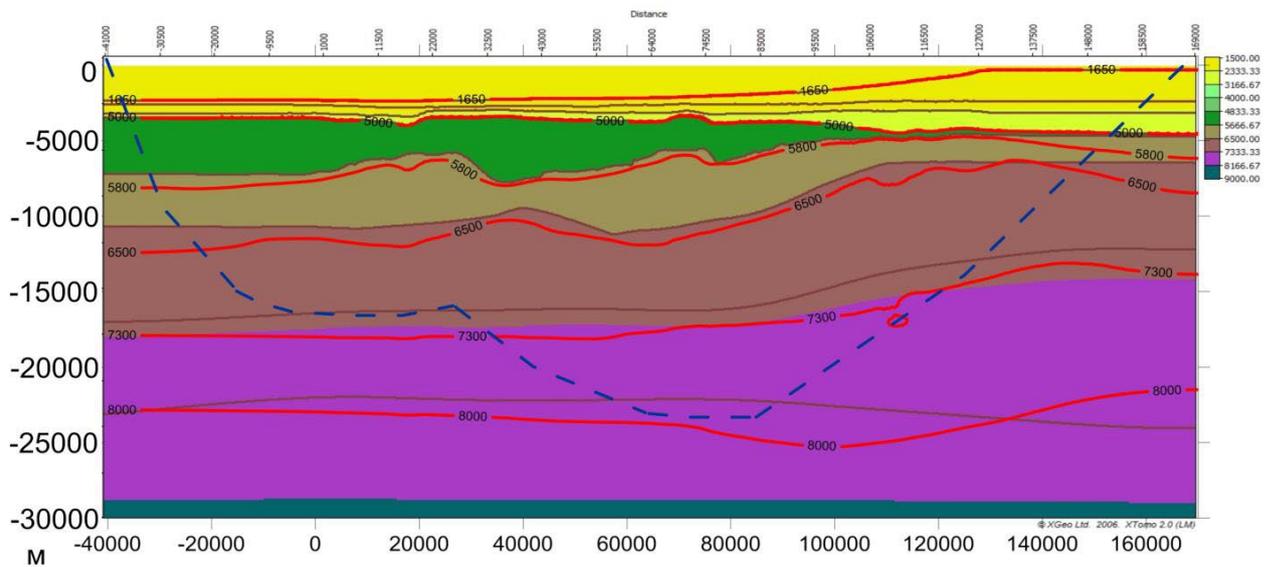


Рисунок 1.2.2.4 Скоростной разрез с заданными геологическими границами (коричневый цвет) и наложенными на него изолиниями скоростей по данным томографии (красный цвет). Пунктиром показана область лучепокрытия, за пределами которой модель в процессе томографии восстанавливается некорректно (Половков, 2012)

- б) Результаты сейсмической томографии наглядно отражают латеральную изменчивость скоростей, наличие высокоскоростных и низкоскоростных аномалий, связанных с определенными геологическими объектами (мерзлота, газовые скопления и т.п.).
- в) Значения скоростей, получаемые при выполнении сейсмической томографии, дают усредненные скоростные характеристики среды (рис. 1.2.2.5), однако если пересчитать их в средние скорости, то они будут стремиться (с разницей порядка 1-3%) к средним скоростям в среде (Половков, 2012), а значит их можно использовать для оценки интервальных скоростей и преобразования временных разрезов в глубинные в случае отсутствия другой достоверной информации (например при отсутствии данных о скоростях, полученных на основе анализа отраженных волн).

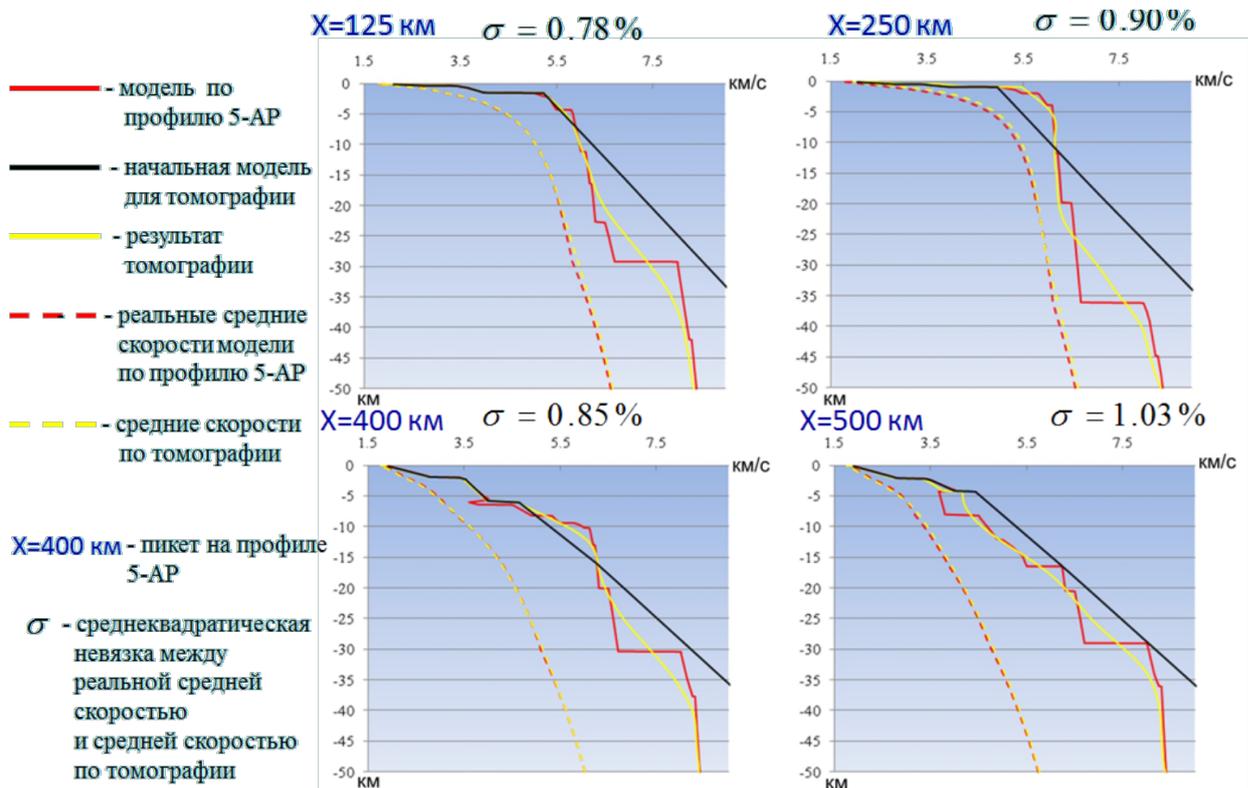


Рисунок 1.2.2.5 Сопоставление скоростей, полученных в результате сейсмической томографии на основе первых вступлений, и заданных скоростей в среде (по результатам математического моделирования) (Половков, 2012)

### 1.2.3 Теоретические основы метода MASW

Метод MASW в настоящее время является широко используемым методом определения скоростей распространения поперечных волн  $V_S$  в верхней части разреза. Теория метода подробно описана в литературе (Park et al., 1999; Socco, Strobbia, 2004). Целевыми волнами являются моды псевдорэлеевской поверхностной волны (упрощенно называемой волной Рэлея на границе грунт/воздух или волной Шольте на границе грунт/вода). В слоистых и градиентных средах такие волны характеризуются дисперсией – изменением фазовой скорости волны Рэлея  $V_R$  с возрастанием частоты, а, следовательно, с изменением глубины проникновения волны в среду. Фазовая скорость волны Рэлея  $V_R$  в первую очередь зависит от скорости поперечных волн  $V_S$  и коэффициента Пуассона  $\sigma$ . Однако зависимость от коэффициента Пуассона очень слабая: при изменении коэффициента Пуассона  $\sigma$  от 0 до 0.5 значение  $V_R$  изменяется в пределах от  $0.87V_S$  до  $0.96V_S$ . Можно считать, что волна Рэлея распространяется вдоль свободной поверхности полупространства со скоростью  $V_R \approx 0.9V_S$ , следовательно, можно получать распределение скоростей  $V_S$ , в том числе и оценивать их изменение с

глубиной. Зная из априорных данных значения коэффициентов Пуассона в изучаемой среде можно получать значения скоростей  $V_S$  с высокой точностью.

Обработка поверхностных волн в рамках метода MASW осуществляется в несколько этапов:

- а) Выделение целевых волн;
- б) Построение и анализ дисперсионных изображений;
- в) Инверсия.

Учитывая, что более 60% энергии взрыва идет на образование поверхностной волны Рэлея, энергия которой, в свою очередь, затухает как  $1/r$  ( $r$  – расстояние от источника до приемника), в отличие от отраженной волны, где энергия затухает как  $1/r^2$ , то для выделения целевого сигнала требуется минимальное количество процедур. Пример исходной полевой записи в сравнении с результатами применения обозначенных выше процедур показан на рисунке 1.2.3.1.

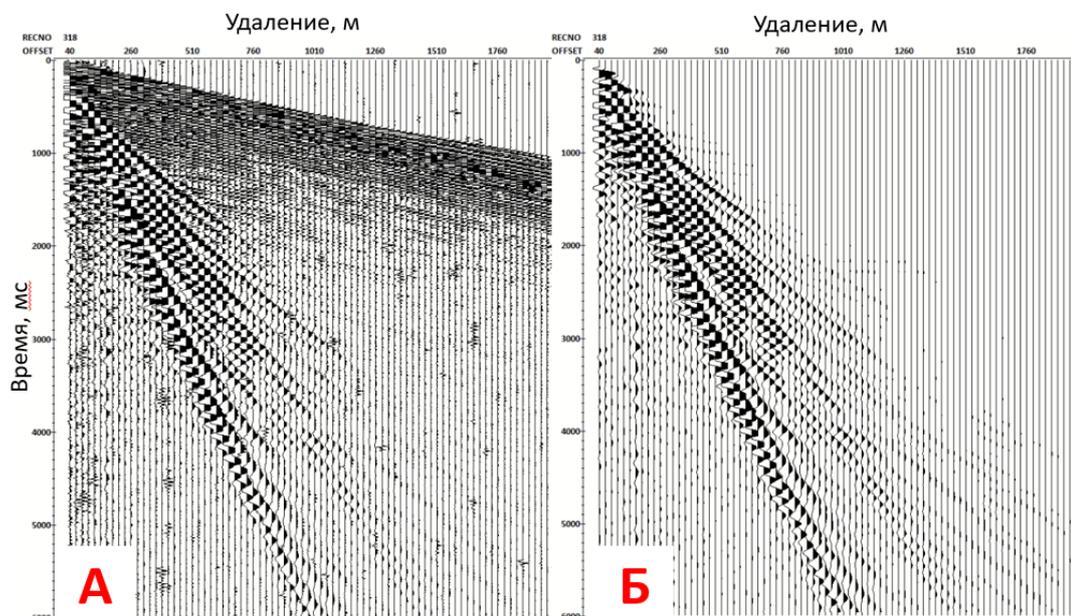


Рисунок 1.2.3.1 Пример сейсмограммы ОПВ: а) исходная полевая запись; б) после выделения полезного сигнала

При помощи специальной обработки цуг поверхностных волн преобразуется из области  $t-x$  в область  $V_R-f$ . Получаемое изображение называется дисперсионным изображением, наглядно отражающим зависимость скорости поверхностной волны от частоты. Обработчику необходимо проанализировать данное изображение и задать зависимость  $V_R(f)$ , называемую дисперсионной кривой, коррелируя максимумы когерентности. Пример дисперсионного изображения и выделенной дисперсионной кривой показан на рисунке 1.2.3.2.

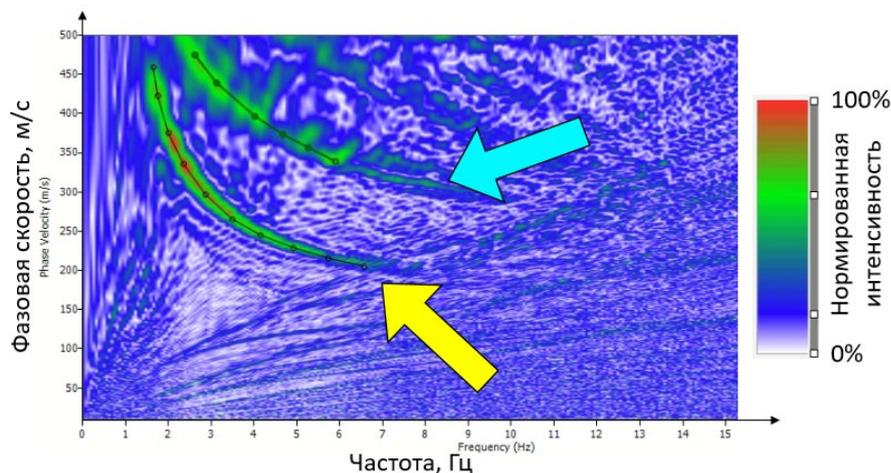


Рисунок 1.2.3.2 Дисперсионное изображение и выделенные дисперсионные кривые.

Желтая стрелка – фундаментальная мода; голубая – высшая мода

На этапе инверсии выполняется построение такой модели среды, для которой невязка между рассчитанными и наблюдаемыми дисперсионными кривыми сводится к минимуму. Как правило, на этапе инверсии подбираются скорости поперечных волн, поскольку они наибольшим образом влияют на характер дисперсионной кривой, а значения коэффициентов Пуассона фиксируются.

При выполнении инверсии среда рассматривается горизонтально-слоистой, при этом свойства среды в пределах каждого слоя неизменны. Инверсия выполняется для каждой дисперсионной кривой отдельно, независимо от других кривых, а результатом становится набор 1D скоростных моделей, каждая из которых относится к центру соответствующей приемной расстановки. Набор таких одномерных моделей позволяет сформировать двухмерные и, при соответствующих системах наблюдения, трехмерные изображения среды. Пример результата инверсии для одной дисперсионной кривой показан на рисунке 1.2.3.3, а результат интерполяции между 1D моделями показан на рисунке 1.2.3.4.

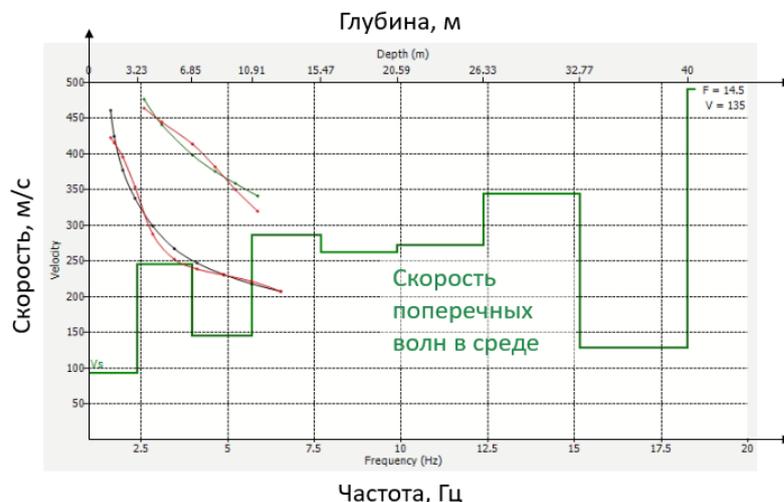


Рисунок 1.2.3.3 Пример результата инверсии MASW для одной дисперсионной кривой

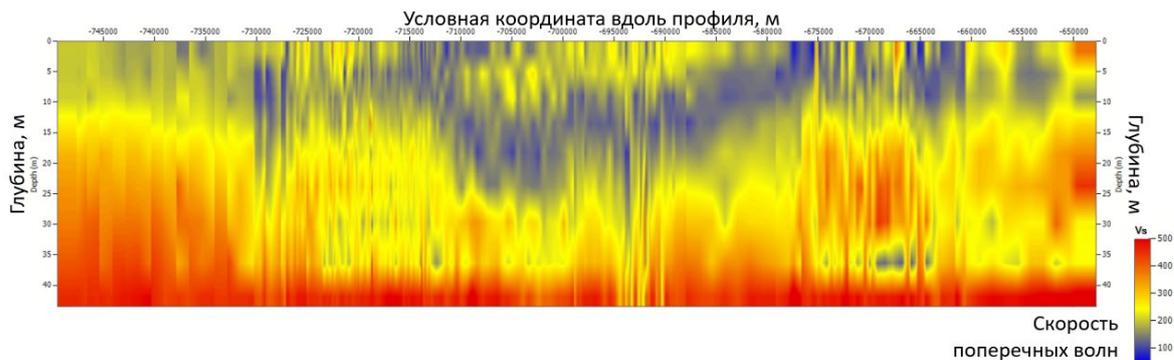


Рисунок 1.2.3.4 Пример скоростного разреза распределения скоростей поперечных волн, полученный в результате инверсии MASW

### 1.3 Предлагаемая методика работ с донными станциями

Предлагаемая методика работ предполагает проведение работ НСАП с плавающими системами регистрации с предварительно разложенными на дне донными регистраторами (рис. 1.3.1). В таком случае возможна запись дополнительных целевых волн различного типа и класса: поверхностных, обменных и преломленных волн (Polovkov et al., 2018). Далее предполагается комплексная обработка классическими методами инженерной сейсморазведки: сейсмическая томография, метод  $t_0$ , метод MASW.

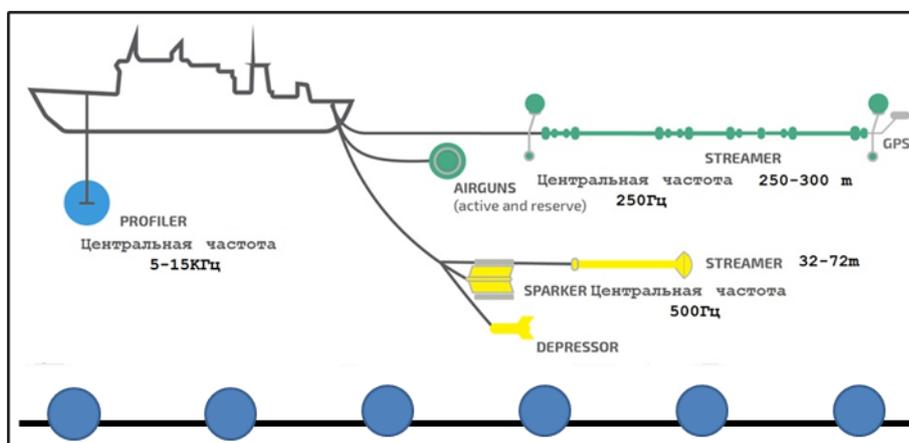


Рисунок 1.3.1 Выполнение инженерно-геофизических работ по предлагаемой методике

Совместная обработка зарегистрированных данных, теоретически, позволяет определить скорости продольных и поперечных колебаний в среде, выявить области с повышенной и пониженной концентрацией газа, определить тип флюида и т.п. Эффективность такого подхода частично апробирована в целом ряде научно-исследовательских проектов, выполненных на шельфе мирового океана с целью изучения газогидратов (Dash, Spence, 2011; Sha et al., 2015). Преимущества изучения газовых залежей и нижележащих осадков с использованием обменных волн, которые не

затухают в газонасыщенных средах, убедительно доказаны в нефтегазовой сейсморазведке (Osdal et al., 2016) и не вызывают сомнений. Также имеются примеры успешно выполненных инженерных проектов с донными станциями, в которых в качестве целевой волны использовалась поверхностная волна Шольте (Hou et al., 2016), а обработка данных выполнялась в рамках метода MASW (Park et al., 2007). Преломленные волны, выходящие в первые вступления, могут быть использованы для построения глубинно-скоростной модели и последующей миграции сейсмических разрезов (Polovkov, 2012; Roslov, Polovkov, 2010).

## 2 ПРОВЕДЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АКВАТОРИИ ОБСКОЙ ГУБЫ

### 2.1 Методика и технология работ

В период с 29 июля по 24 сентября 2020 г силами компании ООО «СПЛИТ» выполнялись инженерно-геофизические исследования на газовом месторождении Каменномысское-море. Месторождение расположено в центральной части Обской губы Карского моря, территория ЯНОА Тюменской области РФ. По размеру запасов газа объект относится к категории уникальных (555 млрд м<sup>3</sup> по сумме категорий С1 и С2). Акватория месторождения отличается экстремальными условиями: низкие температуры (до минус 60° С), сильные штормы, небольшие глубины (5-12 м), толстые и плотные пресные льды. Начало добычи газа планируется в 2025 г. (<https://www.gazprom.ru/projects/kamennomyssskoe/>). Месторождение характеризуется наличием газонасыщенных грунтов в ВЧР.

Целью инженерных изысканий для подготовки проектной документации для объектов, расположенных на шельфе и в прибрежной зоне моря, является получение необходимых и достаточных материалов и данных о природных и техногенных условиях выбранных площадок, составления прогноза изменения природных условий, а также, – взаимодействия этих объектов с окружающей средой, обоснование их инженерной защиты и обеспечение экологической безопасности (Полевой отчет..., 2020). Для достижения поставленной цели были выделены следующие задачи (Полевой отчет..., 2020):

- а) выполнение съемки рельефа дна;
- б) изучение верхней части геологического разреза, в зоне взаимодействия естественного основания и с фундаментом проектируемых сооружений;
- в) установление границы ММП (при ее наличии на изучаемую глубину) в прибрежной части;
- г) изучение ледовых условий (по фондовым данным);
- д) обнаружение, идентификация и нанесение на карту потенциальных геологических и техногенных опасностей, которые могут повлиять на проектирование и эксплуатацию газопровода газового месторождения Каменномысское-море – берег и строительство объектов обустройства месторождения.

В состав работ входили как инженерно-геодезические изыскания, так и инженерно-геофизические исследования. В состав последних входили следующие виды работ (Полевой отчет..., 2020):

- а) ССВР;
- б) ВЧ НСП;
- в) ГЛБО;
- г) Гидромагнитная съемка;
- д) Сейсморазведка МПВ и MASW с использованием донных систем регистрации.

Сейсморазведочные работы с применением донных станций выполнялись согласно предлагаемой методике работ на двух площадках: ЛСП «А» и ЛСП «БЖ» (рис. 2.1.1). Обе площадки имеют размеры 900×900 м, но разные системы наблюдений. Объект ЛСП «БЖ» имеет равномерную сеть расположения ПП (донных станций) по сети с шагом 150×150 м (рис. 2.1.2) (Полевой отчет..., 2020). Объект ЛСП «А» также имеет равномерную сеть расположения ПП по сети с шагом 150×150 м, увеличенную плотность ПП в центре площадки (полигон 200×200 м с сетью расположения ПП по сети 25×50 м) и увеличенную плотность ПП по центральному субширотному и субмеридиональному профилям (шаг между ПП 75 м) (рис. 2.1.3) (Потемка и др., 2020; Полевой отчет..., 2020).

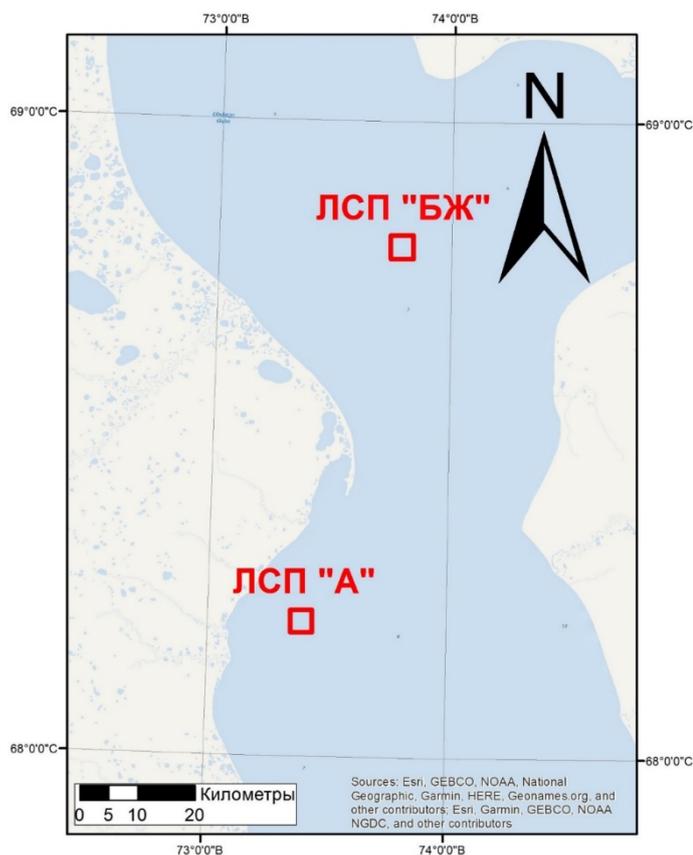


Рисунок 2.1.1 Расположение исследуемых площадок

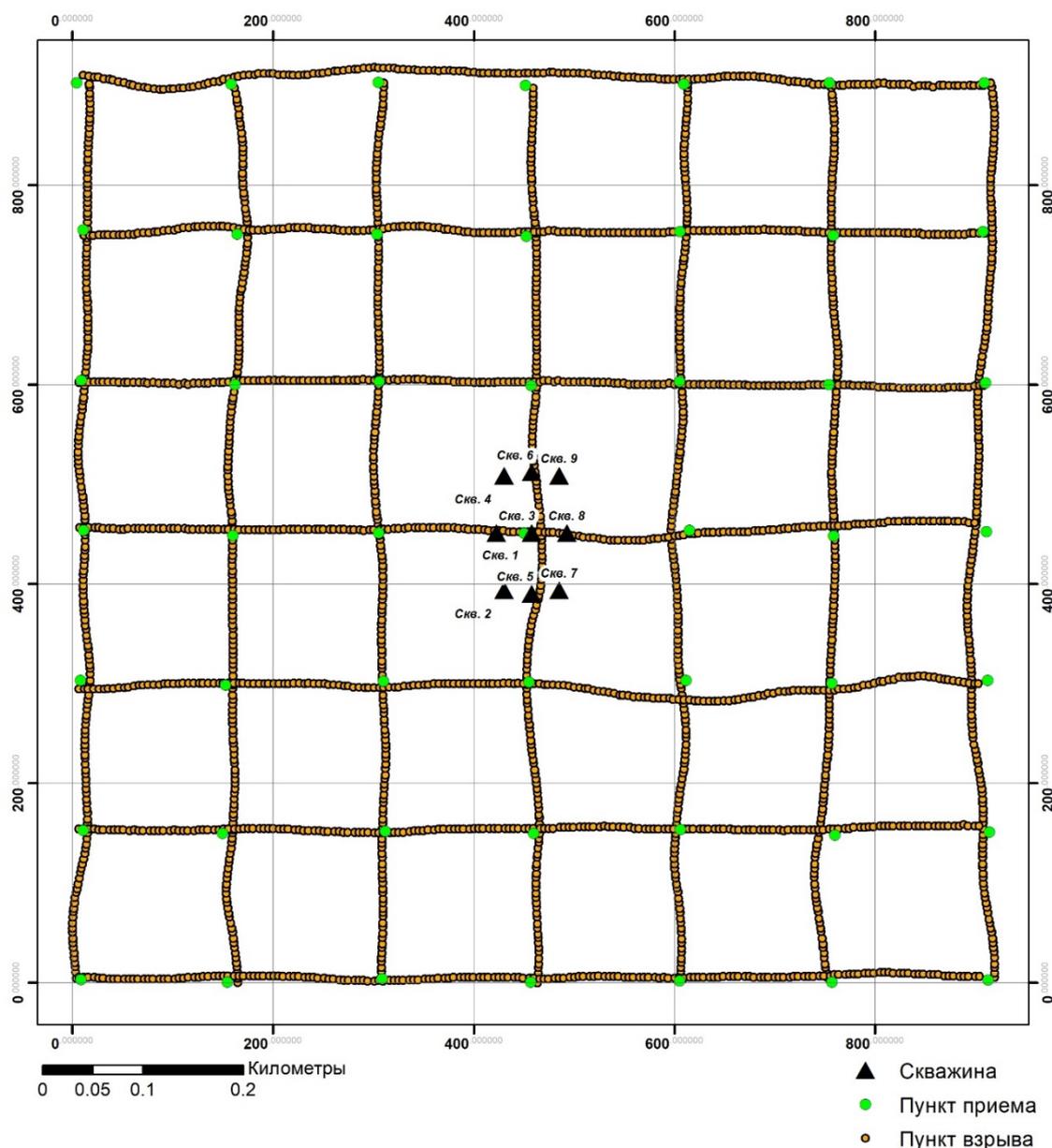


Рисунок 2.1.2 План расположения ПП, ПВ и скважин на объекте ЛСП «БЖ»

На обоих полигонах ПВ были расположены непосредственно над всеми линиями ПП. Шаг между ПВ равен 5 м. Заглубление источника составляло 5 м. Приемники располагались на глубине 11 м (на дне). Минимальный офсет был равен 0 м, максимальный – 900 м.

Для выполнения работ было мобилизован т/х «Николая чудотворец» (рис. 2.1.4), технические характеристики представлены в таблице 2.1.1. В качестве приемников использовались донные станции Z700 производства компании Magseis Fairfield ASA в количестве 100 шт. В качестве источника использовалась пневмопушка Sleeve Gun I и компрессор высокого давления ДК-2 (Потемка и др., 2020; Полевой отчет..., 2020). Основные характеристики указанной аппаратуры приведены в таблице 2.1.2.

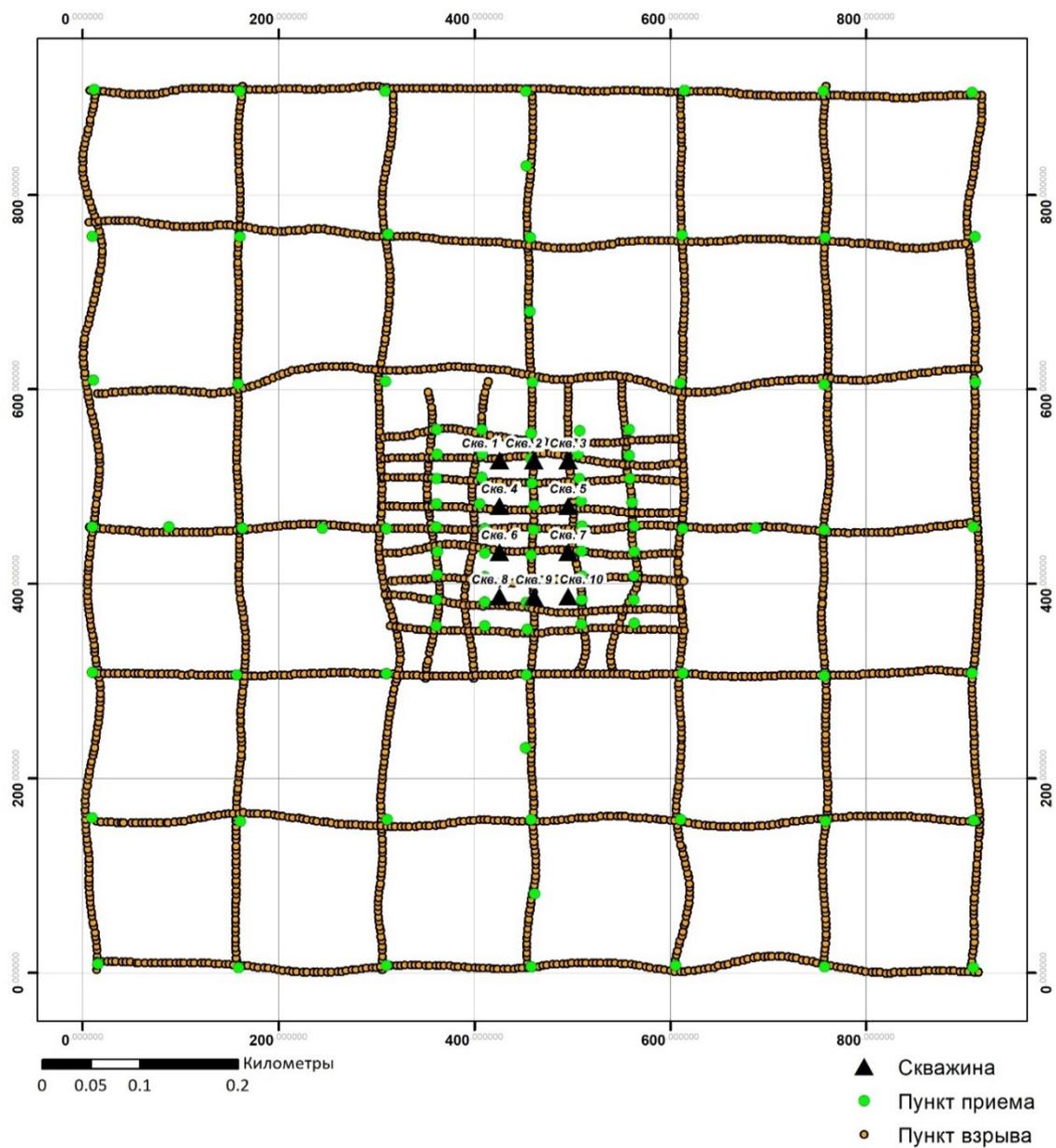


Рисунок 2.1.3 План расположения ПП, ПВ и скважин на объекте ЛСП «А»



Рисунок 2.1.4 Т/х «Николая Чудотворец»

Таблица 2.1.1

## Технические характеристики т/х «Николай чудотворец»

Параметр	Значение
Постройка	Котлас, 1977, проект Р-33Б; модернизации: 2008, 2017
Порт приписки	Архангельск
Флаг	РФ
Размерения	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-26А3, 2х272 КВт; генератор 1х60 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 2.1.2

## Оборудование для геофизических исследований

Основные характеристики	Фото
<b>Автономная донная сейсмическая станция FireField Z700</b>	
<p>Кол-во каналов – 4</p> <p>Шаг дискретизации – 2/4 мс</p> <p>Усиление 0-36 dB</p> <p>Рабочая температура – от -10 до +60 °С</p> <p>Автономность – 14 суток</p> <p>Температура обслуживания – от +3 до +40 °С</p> <p>Время полной зарядки – не более 8 ч</p> <p>Таймер – CSAC clock</p> <p>Вес в воздухе – 29 кг</p> <p>Вес в воде – 18 кг</p> <p>Габариты ШхВ 43.2х15.2 см</p> <p>Рабочие глубины – до 700 м</p>	

Основные характеристики	Фото
<b>Пневмопушка Sleeve Gun I</b>	
<p>Объем источника – 20 дюйм<sup>3</sup></p> <p>Ган-контроллер – RGC-4</p> <p>Длина магистрали – 50 м (2 шт.)</p> <p>Рабочее давление – 2000 psi.</p>	
<b>Компрессор высокого давления ДК-2</b>	
<p>Рабочее давление 230 атм.</p> <p>Максимальное давление 250 атм.</p> <p>Фактический вес 900 кг</p> <p>Тип топлива – ДТ</p>	

## 2.2 Анализ исходных сейсмических данных

Рассмотрим типовые сейсмограммы с площадки ЛСП «А» (Указанная далее характеристика волнового поля характерна и для площадки ЛСП «БЖ»). На рисунке 2.2.1 представлены сейсмограммы ОПП с центрального ПП центрального субмеридионального профиля по 4-ом компонентам. На рисунке 2.2.2 представлены их спектры АЧХ. При сравнении волновых картин с разных компонент предпочтение было отдано Н-компоненте гидрофона. Поскольку за основу была взята Н-компонента гидрофона выполнение анализа на предмет наличия перевернутых донных регистраторов не требовался.

Детальный анализ волновых картин проводился с использованием программы Tesseral 2D (v.7.2.8). Была подобрана такая модель среды, при расчете упругого волнового уравнения по которой сейсмограммы наиболее совпадали с начальной сейсмограммой (подобранная модель аналогична модели I в п.2.3, рис. 2.3.7). В результате были выделены следующие волны (рис. 2.2.3): водная волна (выделена красным), преломленная волна с кажущейся скоростью 1.7-1.8 км/с (выделена синим), поверхностные волны Шольте с кажущейся скоростью 0.1-0.15 км/с (выделена зеленым),

поперечная волна по грунту с кажущейся скоростью 0.3 км/с (выделена зелёным). Также на сейсмограммах наблюдаются шумы от судна (выделены желтым) и волны Шольте от предыдущего взрыва (выделены оранжевым).

При изучении АЧХ волновых картин (рис. 2.2.4, 2.2.5) можно выделить следующие закономерности:

- а) Водная волна характеризуется высокочастотным сигналом (125-240 Гц), что связано с интерференционной природой сигнала. Также данная волна затухает достаточно быстро, поэтому оценить точную скорость водной волны без дополнительных способов обработки не предоставляется возможным;
- б) Поверхностным волнам Шольте соответствует сигнал с частотой до 10 Гц;
- в) Преломленная волна выходит в первые вступления на удалениях порядка 400-500 м.

Отдельно стоит отметить поведение волновой картины после подавления высокочастотной компоненты, характерной для водной волны. После применения фильтра низких частот (рис. 2.2.5) первые вступления преломленной волны можно наблюдать на меньших удалениях (порядка 60-80 м). Данная особенность волнового поля послужила предпосылкой к использованию не первых вступлений, а «вторых» вступлений, то есть выполнение обработки данных МПВ по «вторым» вступлениям преломленных волн.

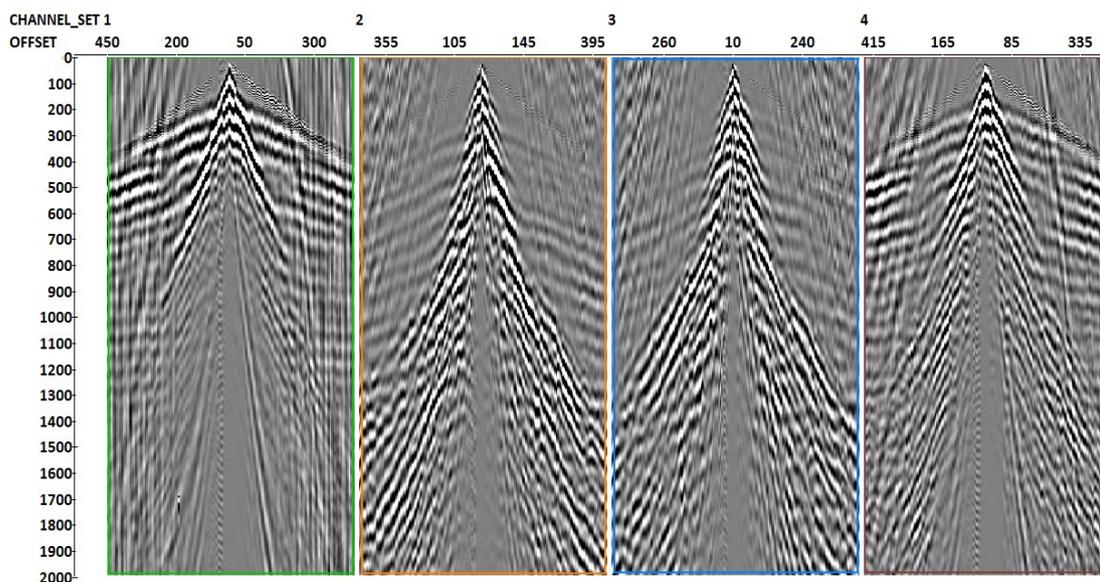


Рисунок 2.2.1 Сейсмограммы ОПП с центрального ПП центрального субмеридионального профиля по 4-ом компонентам. Компоненты слева направо: Н-

компонента гидрофона, X-, Y-, Z-компоненты геофона. Нормализация – индивидуальная, коэффициент усиления 0.3

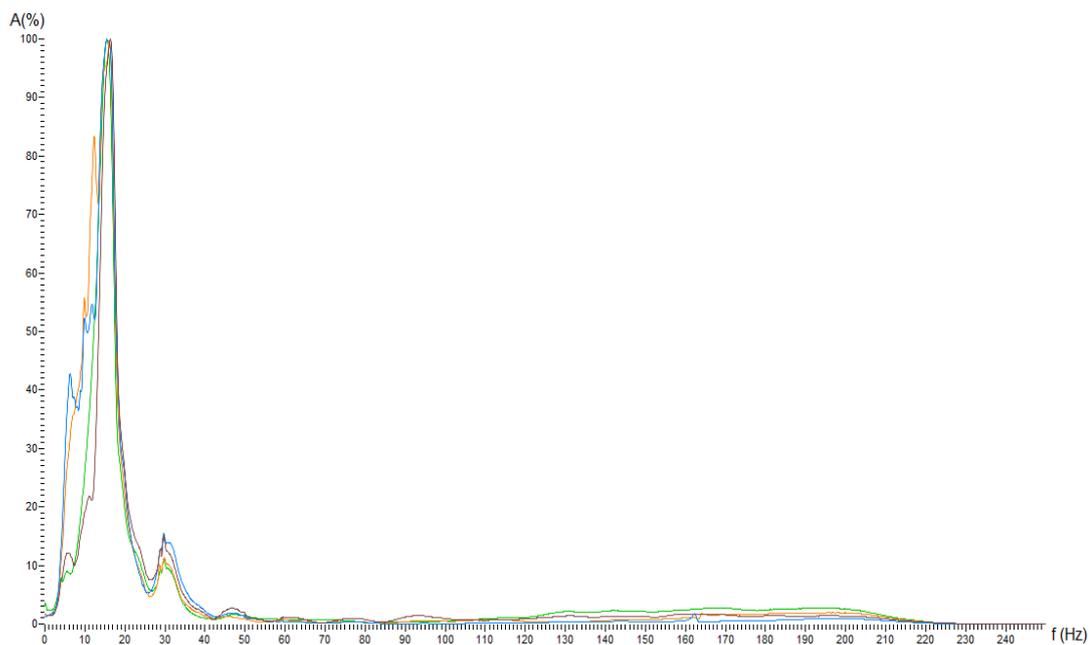


Рисунок 2.2.2 Спектр АЧХ по сейсмограммам с рисунка 2.2.1. Зелёный цвет – АЧХ по N-компоненте гидрофона, оранжевый – АЧХ по X-компоненте геофона, синий – АЧХ по Y-компоненте геофона, коричневый – Z-компонента геофона

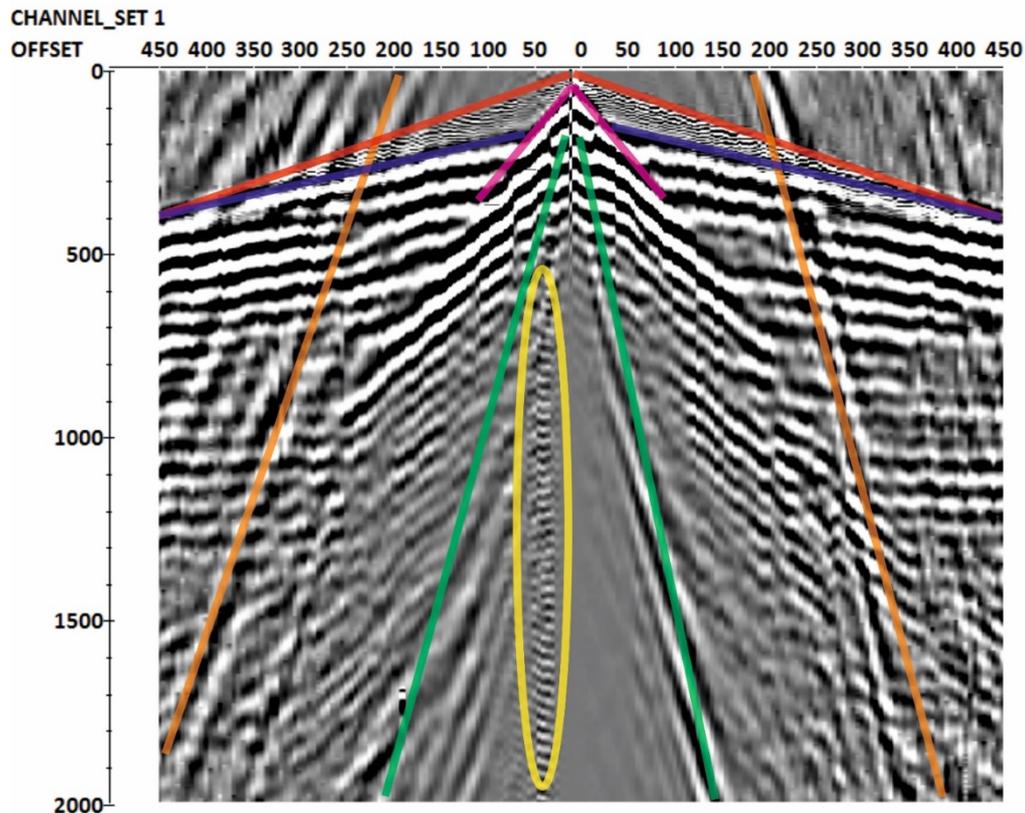


Рисунок 2.2.3 Анализ волнового поля компоненты гидрофона (пояснения см. в тексте).  
 Нормализация – индивидуальная, коэффициент усиления 0.732. Сейсмограмма после  
 применения полосового фильтра Ormsby bandpass filter 1-2-220-225 Гц

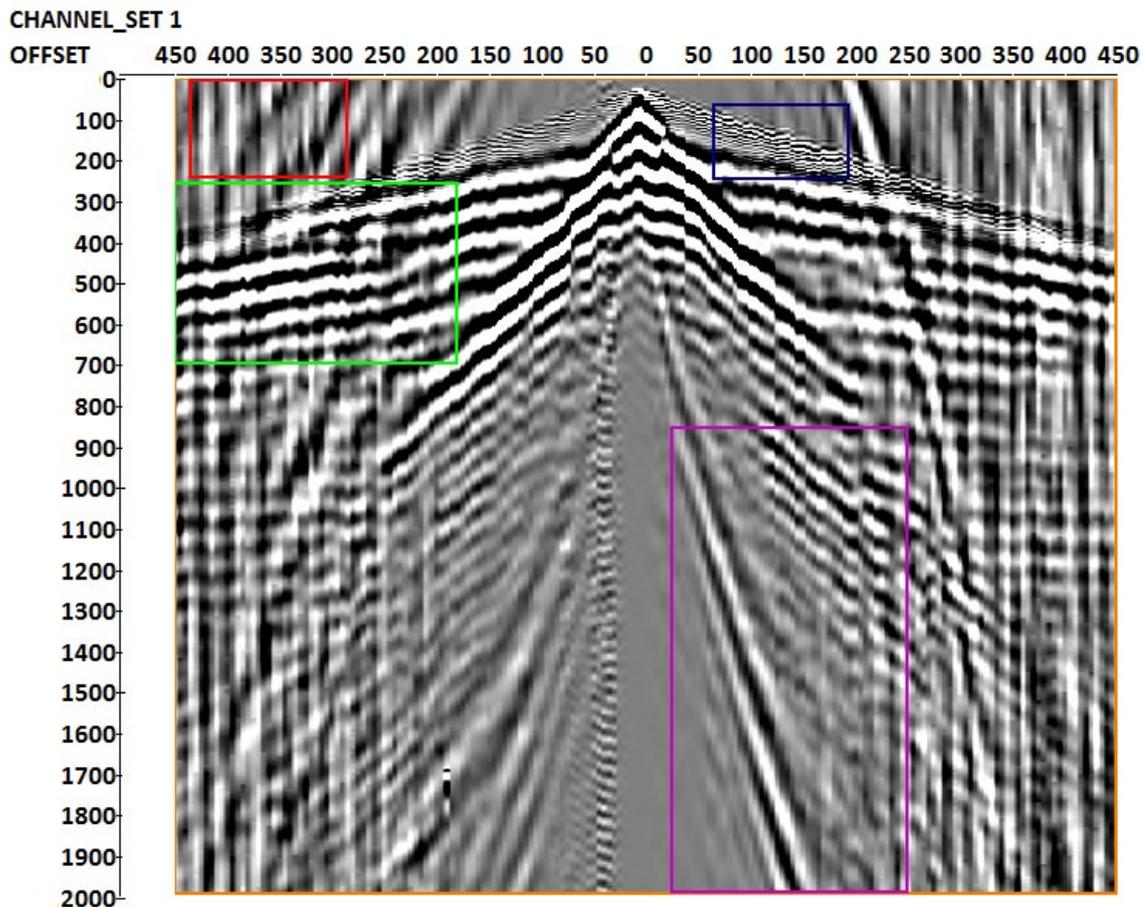


Рисунок 2.2.4 Сейсмограммы ОПП с центрального ПП центрального  
 субмеридионального профиля по Н-компоненте с указанием областей расчета АЧХ.  
 Нормализация – индивидуальная, коэффициент усиления 0.732

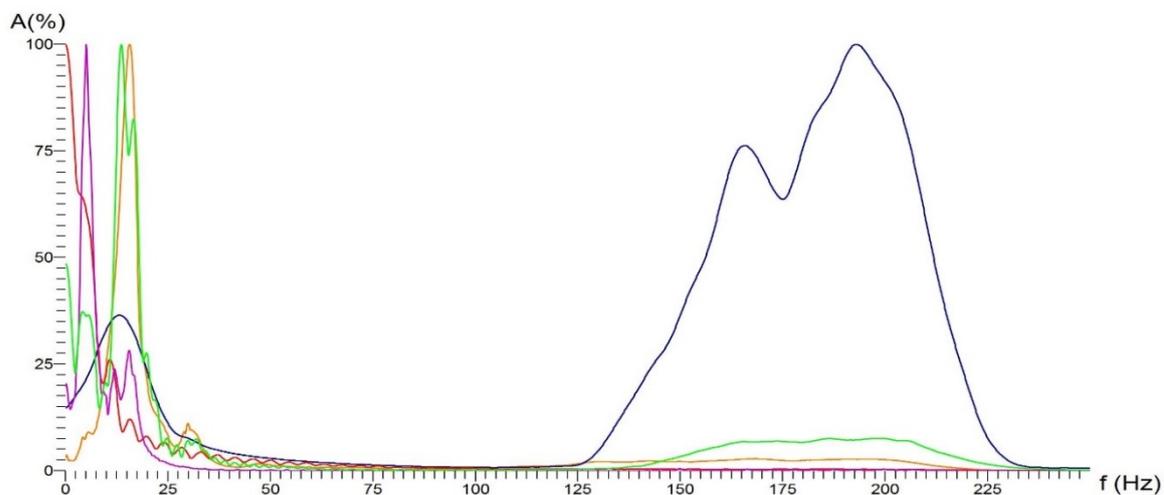


Рисунок 2.2.5 Спектр АЧХ по сейсмограммам с рисунка 2.2.4

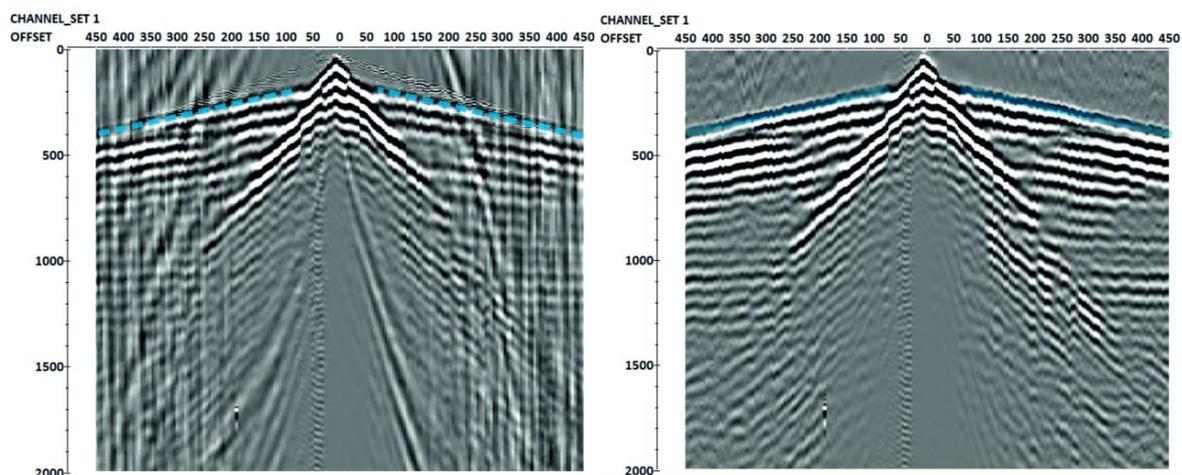


Рисунок 2.2.5 Сейсмограммы ОПП с центрального ПП центрального субмеридионального профиля по Н-компоненте до (слева) и после (справа) применения полосового фильтра Ormsby bandpass filter 4-5-40-45 Гц. Нормализация – индивидуальная, коэффициент усиления 0.3

### 2.3 Проверка гипотезы использования «вторых» вступлений преломленных волн

Прежде чем использовать «вторые» вступления преломленных волн при обработке полученных сейсмических данных МПВ предложенная гипотеза была апробирована на ряде синтетических сейсмограмм. Сейсмограммы были получены в программе Tesseral 2D (v.7.2.8) на 14 типовых моделях (рис. 2.3.1-2.3.6). Модели представляют собой 3-слойные среды с разным залеганием слоёв:

- а) Горизонтальное залегание слоёв (модели I-III, VII-VIII);
- б) Наклонное залегание слоёв (угол падения  $5^\circ$ ) (модели IV, IX-X);
- в) Синклиналь (модели V, XI-XII);
- г) Антиклиналь (модели VI, XIII-XIV).

На 12 моделях (I, IV-XII) параметры слоёв следующие:

- а) Первый слой.  $V_p=1.5$  км/с,  $V_s=0$  км/с,  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>. Отвечает водному слою.
- б) Второй слой.  $V_p=0.6$  км/с,  $V_s=0.225$  км/с,  $\rho=1230$  кг/м<sup>3</sup>. Отвечает слою с газонасыщенными осадками.
- в) Третий слой.  $V_p=1.75$  км/с,  $V_s=1.025$  км/с,  $\rho=1990$  кг/м<sup>3</sup>. Отвечает слою с литифицированными осадками.

На модели II во втором слое  $V_p=1.6$  км/с,  $V_s=0.95$  км/с,  $\rho=1948$  кг/м<sup>3</sup>. На модели III во втором слое  $V_p=1.9$  км/с,  $V_s=1.1$  км/с,  $\rho=2032$  кг/м<sup>3</sup>.

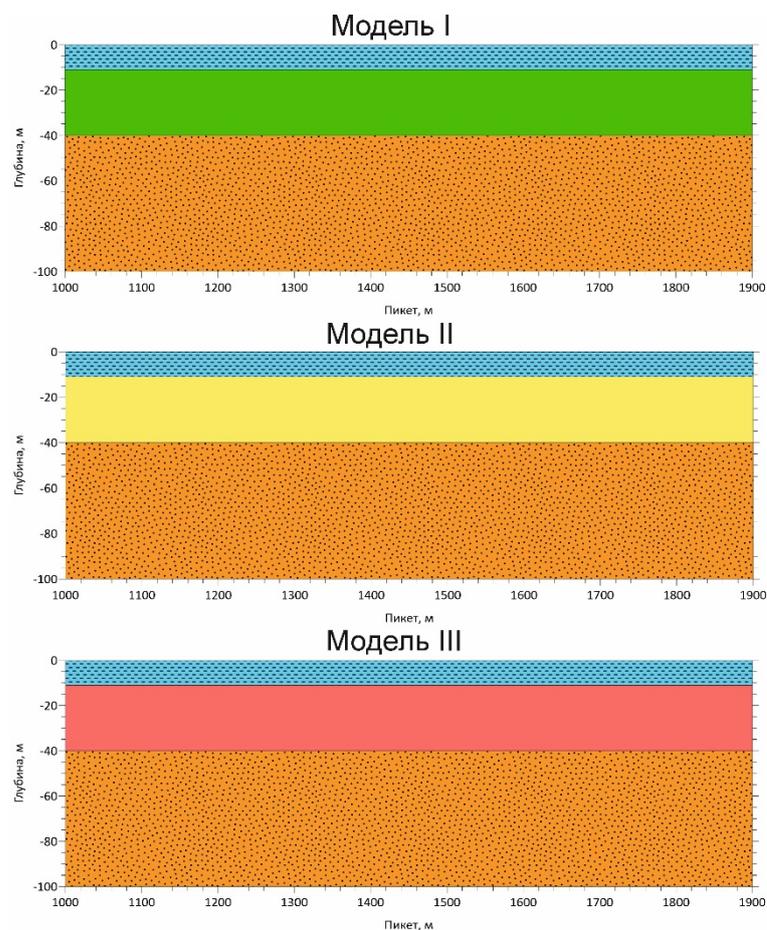


Рисунок 2.3.1 Модели I-III

На моделях VII-XIV во втором слое добавлены аномалии размерами  $50 \times 15$  м (Ш $\times$ Г) с параметрами  $V_p=1.0$  км/с,  $V_s=0.525$  км/с,  $\rho=1536.667$  кг/м<sup>3</sup>. На моделях VII, IX, XI, XIII добавлена одна аномалия в центре второго слоя под центральным ПВ. На моделях VIII, X, XII, XIV добавлены ещё две аномалии на расстояниях в 200 м от центральной аномалии.

В качестве системы наблюдения использовалась аналогичная той, что применялась в ходе работ, но с обращенной геометрией. Таким образом, шаг между ПВ составил 150 м, шаг между ПП 5 м, ПВ находится на глубине 11 м, ПП заглублен на 5 м, максимальный офсет равен 900 м, минимальный – 0 м.

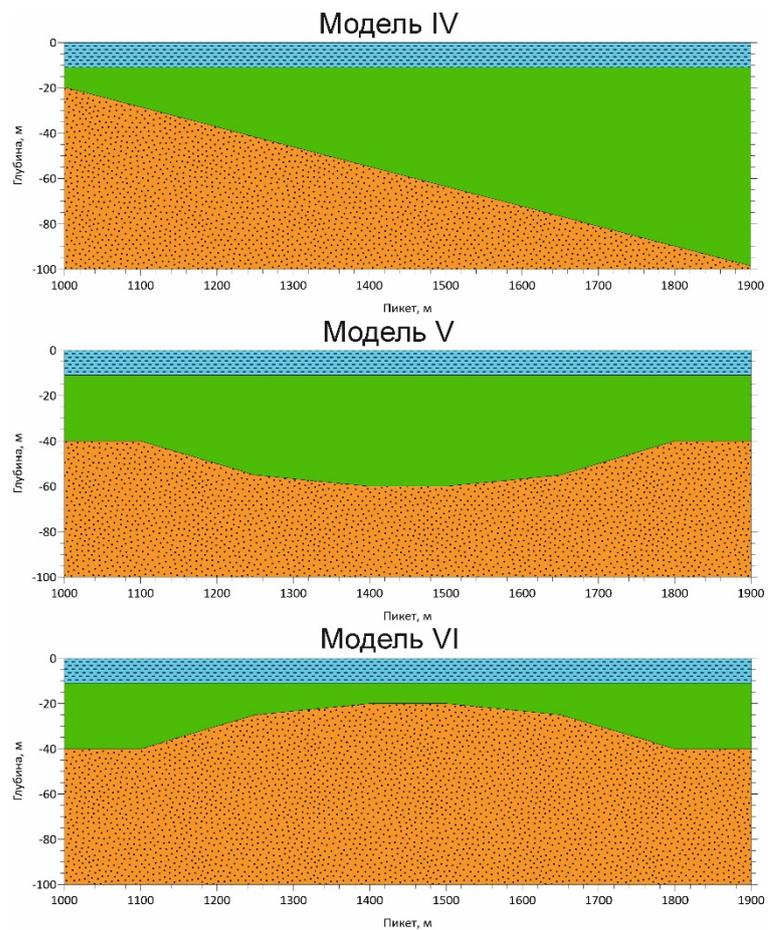


Рисунок 2.3.2 Модели IV-VI

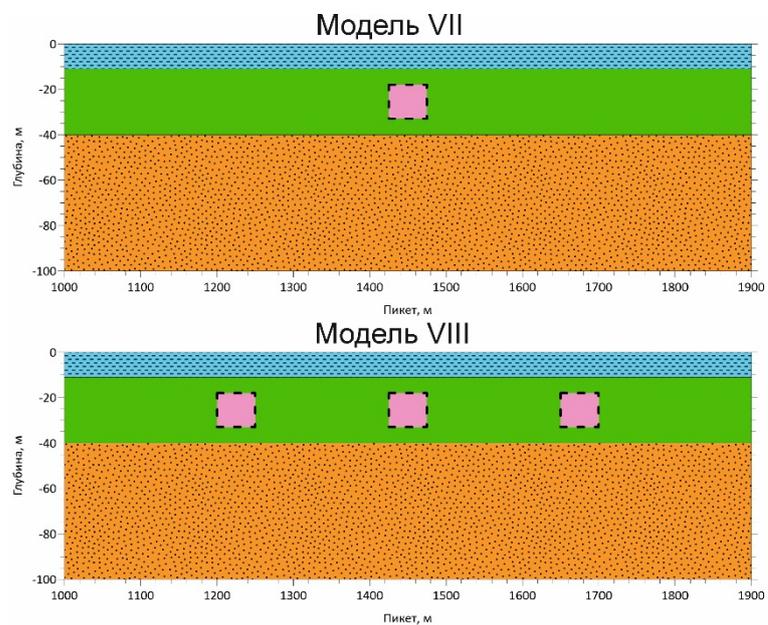


Рисунок 2.3.3 Модели VII-VIII

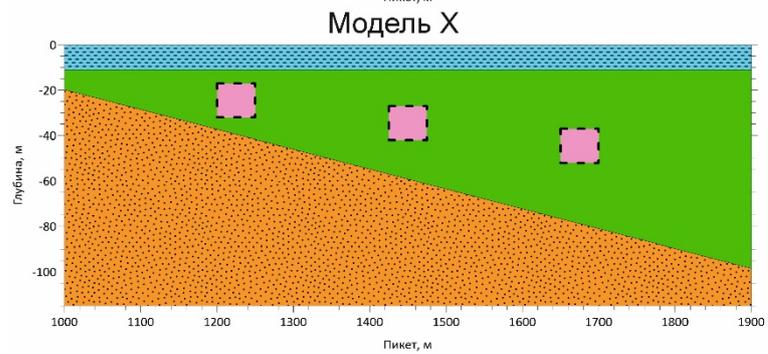
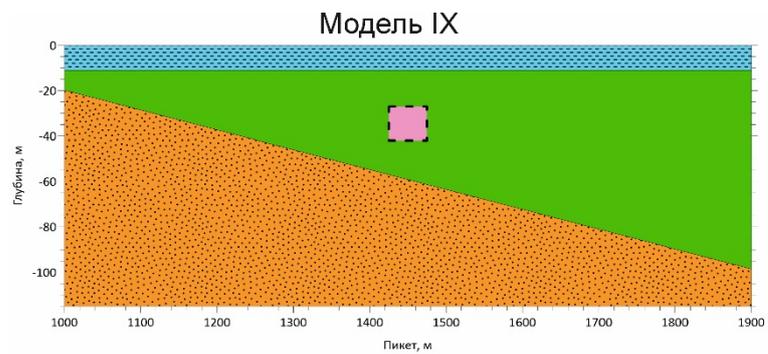


Рисунок 2.3.4 Модели IX-X

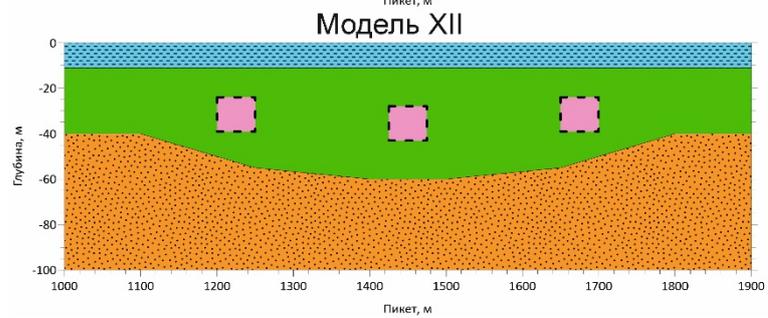
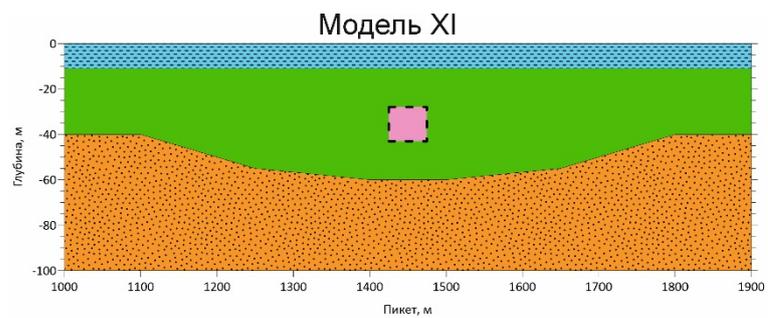


Рисунок 2.3.5 Модели XI-XII

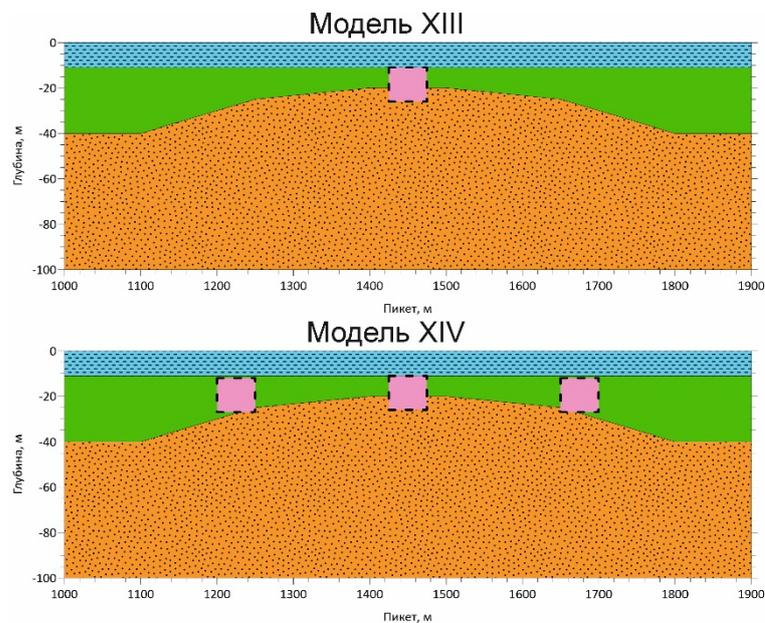


Рисунок 2.3.6 Модели XIII-XIV

Для моделирования использовался сигнал с центральной частотой 30 Гц. Частота квантования равна 2 мс. Для моделирования использовалось упругое волновое уравнение (wave equation elastic) со свободной поверхностью (surface free). Пример полученной сейсмограммы с центральной системой наблюдения по модели I представлен на рисунке 2.3.7.

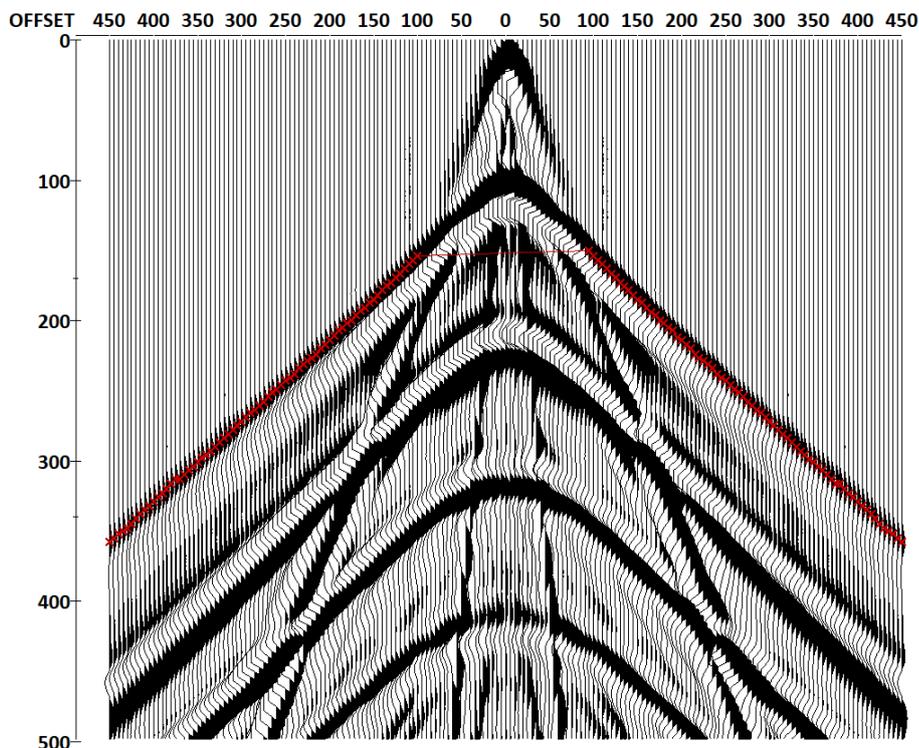


Рисунок 2.3.7 Сейсмограмма ОПВ с центрального ПВ, полученная в результате математического моделирования в программе Tesseral 2D, с указанием пикировки «вторых» вступлений по предложенной гипотезе. Нормализация – индивидуальная, усиление – 0.5

Далее полученные сейсмограммы вводились в обрабатывающий пакет RadExPro (v.2018.2), где происходила пикировка «вторых» вступлений. Поскольку обрабатывались модельные данные, то процедур предварительной обработки не требовалось. Далее полученные времена прихода сигнала выгружались в текстовый формат (ASCII) и переформатировались в формат \*.srt, использующийся программой XТomo-LM (v.3.4.1) для выполнения 2D сейсмотомографии. На первом этапе в программе задавалась начальная градиентная модель среды. Модель имела размеры 1100×300 м с размером ячейки 20×5 м, скорости распространения упругих колебаний имели диапазон от 1.5 км/с (в верхней части модели) до 3 км/с (в нижней части модели). Далее выполнялся алгоритм инверсии (аналогично указанному в п.1.2.2). Инверсия выполнялась в 5 этапов:

- а) Инверсия при параметре  $\alpha$  5;
- б) Интерполяция модели;
- в) Инверсия при параметре  $\alpha$  1;
- г) Инверсия при параметре  $\alpha$  0.5;
- д) Инверсия при параметре  $\alpha$  0.1.

Постоянными параметрами инверсии являются:

- а) Метод: Evening Damper;
- б) Параметр  $\beta$ : 10;
- в) Точность: 0.001;
- г) Ограничение по количеству итераций: 400.

В результате были получены разрезы, отображающие на качественном уровне латеральные изменения скоростей продольных волн (рис. 2.3.8-2.3.14). При анализе полученных результатов можно с уверенностью утверждать, что «вторые» вступления можно использовать для обработки данных МПВ способом сейсмической томографии. Распределение скоростей распределения продольных волн повторяет контуры начально заданной модели. Однако на моделях, на которых присутствуют аномалии во втором слое, не предоставляется возможным определить с чем связана аномалия скоростей: полученные изображения можно интерпретировать как локальные аномалии во втором слое, так и неровности границы между вторым и третьим слоем.

Полученная пикировка прихода преломленной волны также обрабатывалась способом  $t_0$  в модуле Easy Refraction программы RadExPro. Модуль позволяет выполнять инверсию как в автоматическом режиме, так и в ручном. Обработка выполнялась в ручном режиме, то есть были построены сводные годографы, произведена их увязка во взаимных точках и рассчитаны годограф  $t_0$  и разностный годограф. В качестве средней

скорости в перекрывающем слое была выбрана скорость, полученная в результате сейсмотомографии на разных глубинах (10, 20, 30 и 40 м). На рисунках 2.3.8-2.3.14 видно, что форма преломляющей границы мало меняется от смены скоростей в перекрывающем слое. На моделях I и II построить корректную преломляющую границу не получилось.

Таким образом, при апробировании гипотезы применения «вторых» вступлений преломленных волн при обработке сейсмических данных МПВ было доказано состоятельность данного метода. Однако к полученным результатам нельзя относиться, как к истинным. Для более точной интерпретации результатов стоит выполнять бурение и петрофизическое исследование пород с последующей увязкой результатов.

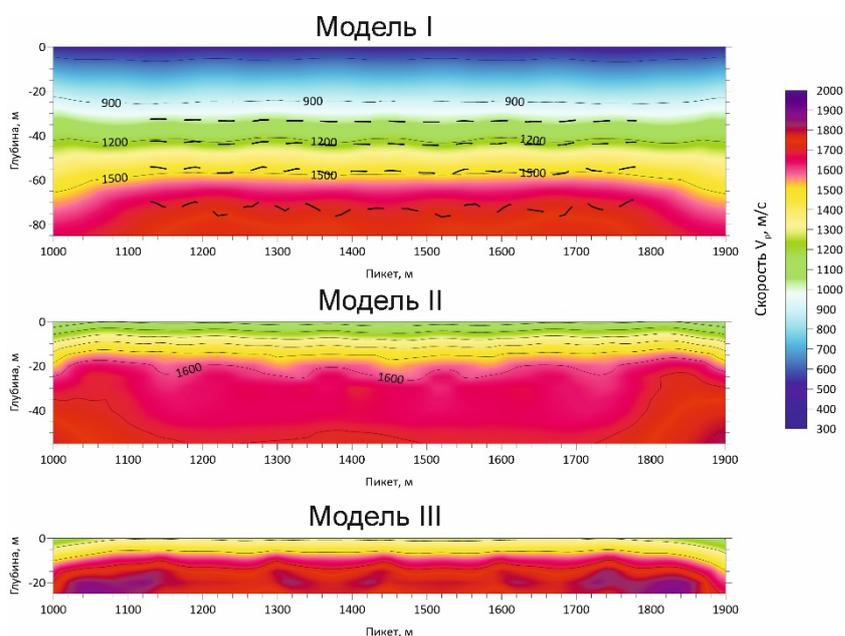


Рисунок 2.3.8 Результат обработки модельных данных способом сейсмической томографии и  $t_0$  по предложенной гипотезе по моделям I-III. Пунктиром на модели I указаны преломляющие границы, посчитанные со средней скоростью в вышележащем слое равной скорости, полученной в результате томографии на глубинах 10, 20, 30 и 40 м

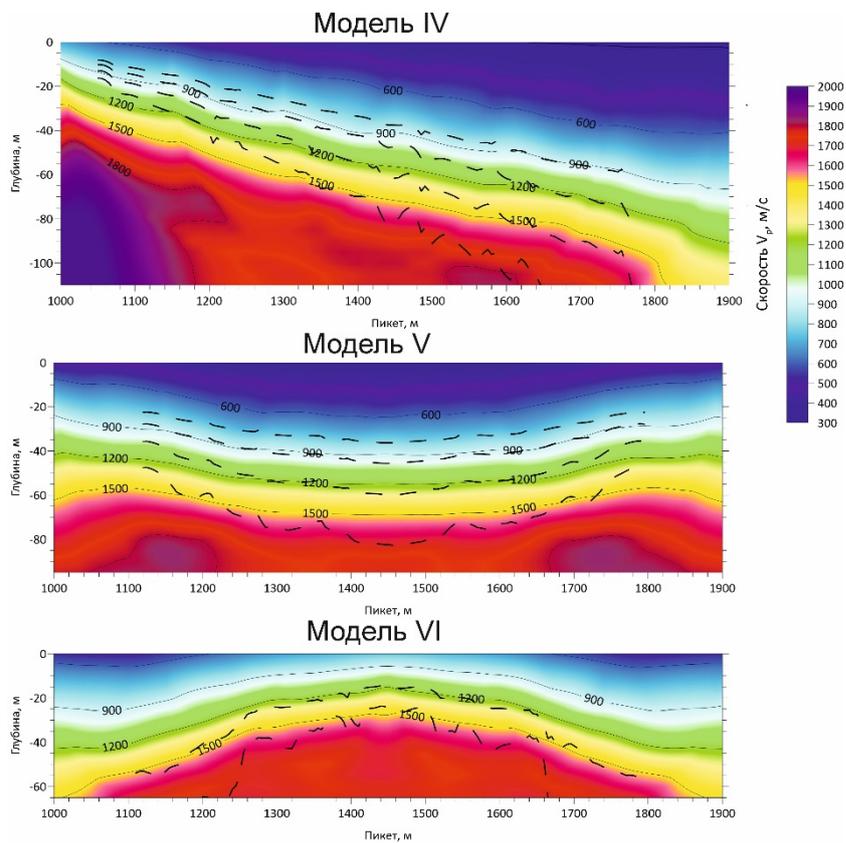


Рисунок 2.3.9 Результат обработки модельных данных способом сейсмической томографии и  $t_0$  по предложенной гипотезе по моделям IV-VI Пунктиром на моделях указаны преломляющие границы, посчитанные со средней скоростью в вышележащем слое равной скорости, полученной в результате томографии на глубинах 10, 20, 30 и 40 м (для модели VI только на глубинах 10 и 20 м)

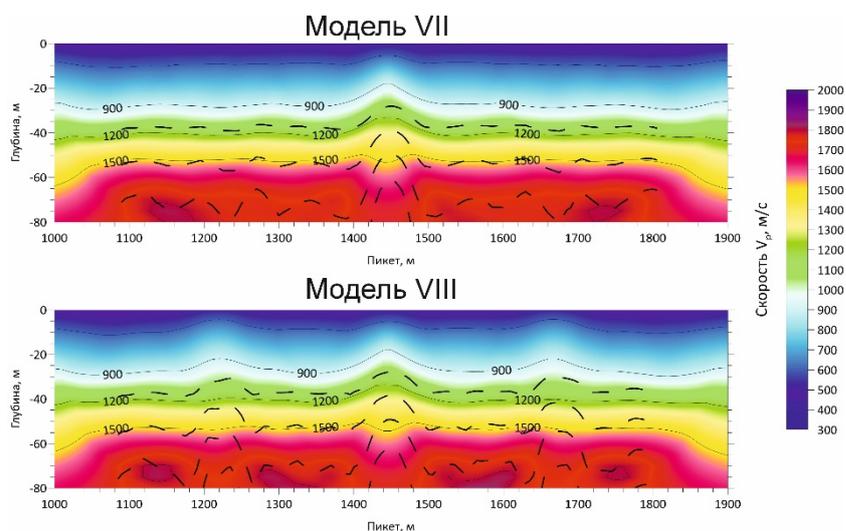


Рисунок 2.3.10 Результат обработки модельных данных способом сейсмической томографии и  $t_0$  по предложенной гипотезе по моделям VII-VIII Пунктиром на моделях указаны преломляющие границы, посчитанные со средней скоростью в вышележащем слое равной скорости, полученной в результате томографии на глубинах 10, 20, 30 и 40 м

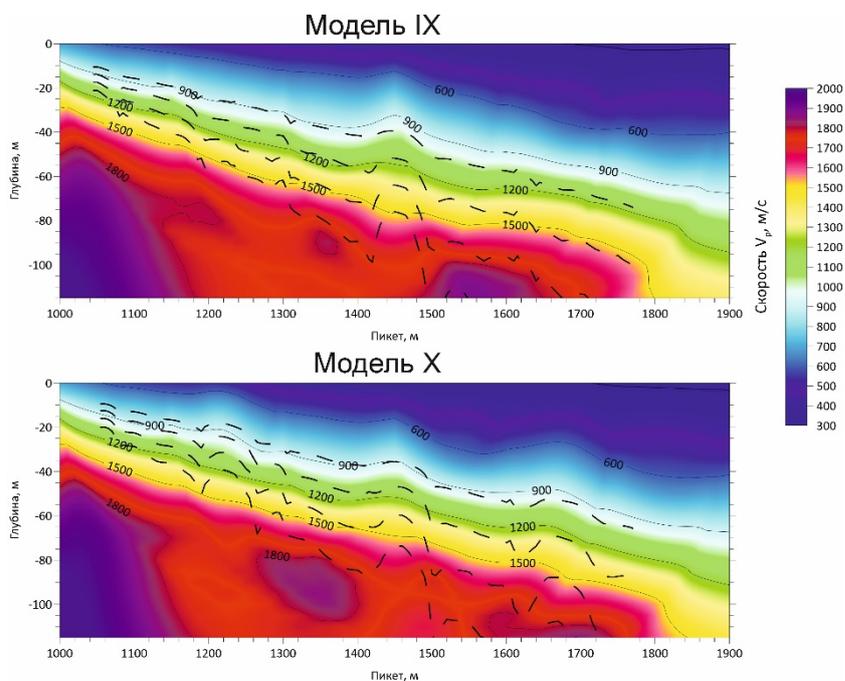


Рисунок 2.3.11 Результат обработки модельных данных способом сейсмической томографии и  $t_0$  по предложенной гипотезе по моделям IX-X Пунктиром на моделях указаны преломляющие границы, посчитанные со средней скоростью в вышележащем слое равной скорости, полученной в результате томографии на глубинах 10, 20, 30 и

40 м

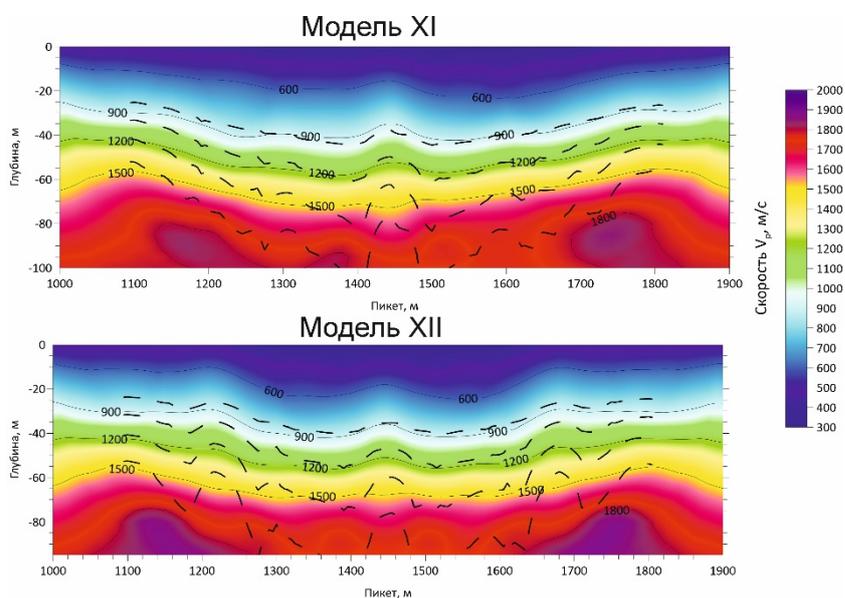


Рисунок 2.3.12 Результат обработки модельных данных способом сейсмической томографии и  $t_0$  по предложенной гипотезе по моделям XI-XII Пунктиром на моделях указаны преломляющие границы, посчитанные со средней скоростью в вышележащем слое равной скорости, полученной в результате томографии на глубинах 10, 20, 30 и

40 м

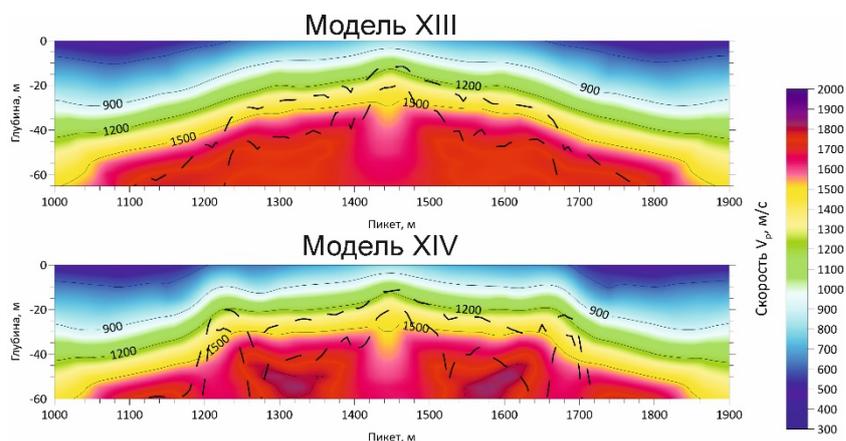


Рисунок 2.3.13 Результат обработки модельных данных способом сейсмической томографии и  $t_0$  по предложенной гипотезе по моделям XIII-XIV Пунктиром на моделях указаны преломляющие границы, посчитанные со средней скоростью в вышележащем слое равной скорости, полученной в результате томографии на глубинах 10 и 20 м

## 2.4 Обработка данных МПВ

Итоговый граф обработки данных МПВ был основан на графе, используемом при обработке модельных данных. В качестве программ обработки также выступали RadExPro (v.2018.2) и XТомo-LM (v.3.4.1). Для способа сейсмической томографии алгоритм следующий:

- а) Применение полосового фильтра Ormsby Bandpass filter 10-20-56-112 Гц с целью подавления высокочастотного сигнала от водной волны и низкочастотного сигнала от поверхностной волны Шольте;
- б) Пикировка «вторых» вступлений преломленной волны;
- в) Выгрузка пикировки из RadExPro в текстовый формат (ASCII) и её дальнейшее преобразование в формат \*.srt;
- г) Подгрузка полученного \*.srt файла в XТомo-LM 3.4.1;
- д) Создание начальной модели среды. Так как на площадке ЛСП «А» имеются длинные (900 м) и короткие (300 м) профили, то для них использовались разные размеры начальной модели. Для длинных профилей (длиной 900 м) использовалась модель размерами 1100×300 м (Ш×Г) с размером ячейки 20×5 м (Ш×Г). Скорость в верхнем слое была задана 1.5 км/с, в нижнем – 3 км/с. Для коротких профилей использовалась аналогичная модель, но с размерами 340×300 м (Ш×Г);

- е) Выполнение инверсии при постоянных параметрах: метод Evening Dampner, параметр  $\beta$  10, точность 0.001, ограничение по количеству итераций 400. Выполнение самой инверсии в 5 этапов:
  - 1) Инверсия при параметре  $\alpha$  5;
  - 2) Интерполяция модели;
  - 3) Инверсия при параметре  $\alpha$  1;
  - 4) Инверсия при параметре  $\alpha$  0.5;
  - 5) Инверсия при параметре  $\alpha$  0.1.

Для способа  $t_0$  алгоритм следующий:

- а) Применение полосового фильтра Ormsby Bandpass filter 10-20-56-112 Гц с целью подавления высокочастотного сигнала от водной волны и низкочастотного сигнала от поверхностной волны Шольте;
- б) Пикировка «вторых» вступлений преломленной волны;
- в) Подгрузка полученной пикировки в модуль Easy Refraction;
- г) Выделение годографов, относящихся к одному слою;
- д) Построение сводных годографов;
- е) Увязка сводных годографов во взаимных точках;
- ж) Построение годографа  $t_0$  и разностного годографа;
- з) Определение глубины до границы слоёв по скважинным данным и расчет средних скоростей на выделенных глубинах;
- и) Построение преломляющей границы с выбором скорости в верхнем слое равной средней скорости, полученной в п.з.

## 2.5 MASW

Обработка поверхностных волн Шольте методом MASW выполнялась аналогично алгоритму представленному в п.1.2.3 в программе RadExPro (v.2018.2). Стоит отметить, что на обеих площадках имелась равномерная сеть распределения ПП по сети 150×150 м. Данный факт являлся предпосылкой к выбору базы наблюдения 0-75 м. Такая база позволила равномерно распределить результаты инверсии метода MASW практически по всем обоим площадкам (исключение составляет объект ЛСП «А», где наблюдается увеличение ПП в центре, рис. 2.1.3). Итоговый граф обработки данных методом MASW следующий:

- а) Разделение всех трасс по наборам, относящихся к каждому отдельному 2D профилю;

- б) Расчет абсолютных значений офсетов (если источник был расположен южнее/западнее, то значению присваивался отрицательный знак);
- в) Обращение геометрии;
- г) Применение полосового фильтра Ormsby bandpass filter 1-2-6-12 Гц с целью подавления всех волн кроме поверхностных волн Шольте;
- д) Выполнение процедуры верхнего (по годографу с прямолинейной осью синфазности 0.19 км/с) и нижнего (по годографу с прямолинейной осью синфазности 0.09 км/с опущенному на 500 мс) мьютинга;
- е) Выделение среди всех трасс те трассы, которые имеют отрицательные значения офсета. Таким трассам в заголовок FFID присваивалось уникальное значение, которое не повторялось бы с трассами, имеющими положительные значения офсета;
- ж) Подача в модуль MASW полученных наборов данных, построение и анализ дисперсионных изображений. При анализе удалялись те дисперсионные изображения, которые интерпретировались неоднозначно или вовсе не имели какой-либо зависимости;
- з) Выделение дисперсионных кривых фундаментальных мод по выбранным дисперсионным изображениям;
- и) Выполнение процедуры инверсии. Для базы наблюдений 0-75 м использовались следующие параметры инверсии: количество слоев – 6, глубина полупространства – 32 м, плотность 1.8 г/см<sup>3</sup> (бралась на основании проведенных инженерно-геологических исследований), коэффициент Пуассона 0.35 (брался на основании проведенных инженерно-геологических исследований), количество итераций – 5, коэффициент Пуассона зафиксирован.

Поскольку глубина исследования при базе наблюдений 0-75 м составляла порядка 32 м, то было принято решение проверить результаты инверсии при базе 0-400 м. При такой базе материалы подвергались повторной обработке по вышеуказанному алгоритму. В графе обработки в п.и параметры инверсии были изменены: количество слоев – 10, глубина полупространства – 52 м.

## 2.6 3D сейсмическая томография

Обработка данных МПВ способом площадной сейсмической томографии не входило в итоговый план работ и было выполнено в целях освоения необходимой

программы обработки и проверки её возможностей. В качестве целевого сигнала использовались «вторые» вступления преломленных волн, применяемые при использовании 2D сейсмотомографии (п.2.3 и 2.4). Для выполнения 3D томографии использовалась программа RadExPro (v.2018.2) и GeoTomo (v.2012), в частности пакет TomoPlus (v.5.4). Пикировка выполнялась в программе RadExPro аналогично графу обработки, представленному в п.2.4 (п.а, б в графе обработки 2D сейсмотомографии). После фиксирования времён прихода преломленной волны данные значения были сохранены в заголовки трасс. Сейсмограммы с сохраненными временами пикировки были выгружены из программы в формате \*.segy и далее были подгружены в пакет TomoPlus.

При создании проекта в TomoPlus было создано правило, при котором из заголовков \*.segy файла была выгружена информация о геометрии и о временах прихода волны. После чего на основании имеющихся данных была создана начальная модель среды с переводом в локальную систему координат. Размер ячейки равен  $10 \times 10 \times 5$  м (Д $\times$ Ш $\times$ Г), что соответствует размеру ячейки, используемой при 2D томографии. Далее выполнялось решение обратной в 2 этапа:

- 1) Выполнение инверсии при увеличенных в два раза ячейках ( $20 \times 20 \times 10$  м, Д $\times$ Ш $\times$ Г) и коэффициенте сглаживания 5. Количество итераций равно 20.
- 2) Выполнение инверсии при исходных размерах ячеек ( $10 \times 10 \times 5$  м, Д $\times$ Ш $\times$ Г) и коэффициенте сглаживания 1. Количество итераций равно 20.

### 3 ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ

#### 3.1 Сравнение полученных результатов с данными со скважин и с результатами НСАП

Сравнение результатов производилось по центральному субмеридиональному профилю площадки ЛСП «А». Вдоль профиля расположены две скважины, по информации из которых производилась увязка результатов.

При рассмотрении сейсмических разрезов ССВР (рис. 3.1.1) можно сделать вывод о скудности полученных результатов. Фиксируется отражение от дна и последующие кратные волны.

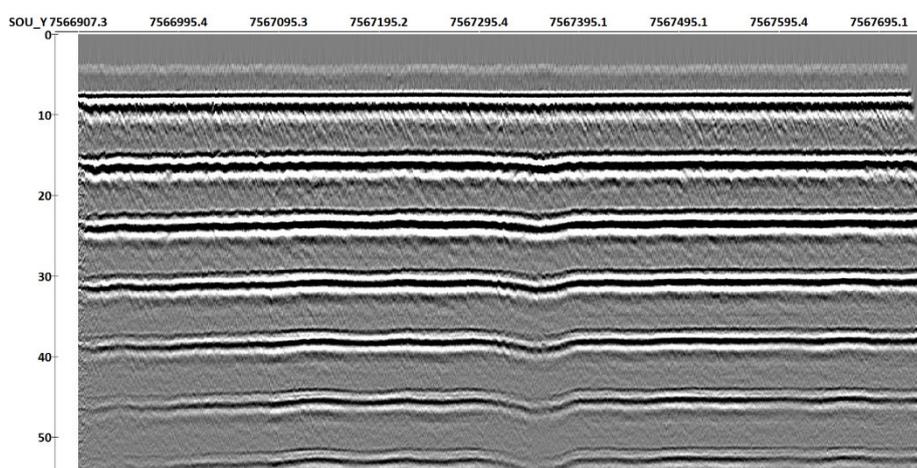


Рисунок 3.1.1 Сейсмический разрез, полученный в результате ССВР с буксируемыми приемниками

На рисунках 3.1.2 и 3.1.3 представлены пример результатов выполнения комплексной обработки сейсмических материалов по указанному профилю. Стоит обратить внимание, что по изолиниям 0.5 и 1.55 км/с на разрезе распределение скоростей продольных волн можно с достаточно высокой точностью определить положение инженерно-геологических границ. То же прослеживается и на разрезах распределения скоростей поперечных волн. Так изолинии 0.2-0.25 км/с можно использовать для прослеживания первой инженерно-геологической границы. Однако достаточно высокая точность определения положения границ была достигнута использованием априорной геологической информации, полученной со скважин. Без их наличия судить можно было бы только об общей конфигурации скоростной модели среды без выделения каких-либо границ.

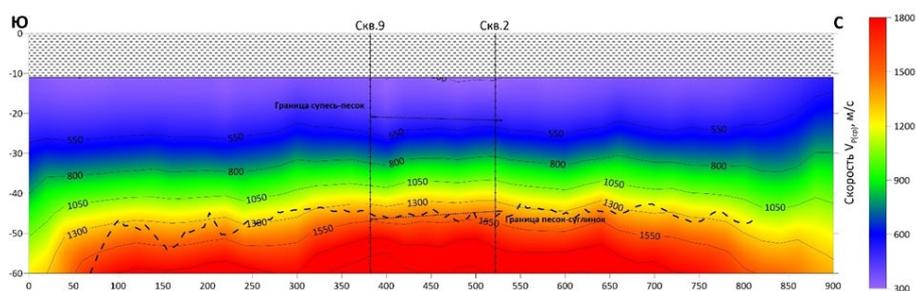


Рисунок 3.1.2 Разрез распределения скоростей распространения продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии по предложенной гипотезе.

Пунктирной линией выделена граница, полученная способом  $t_0$

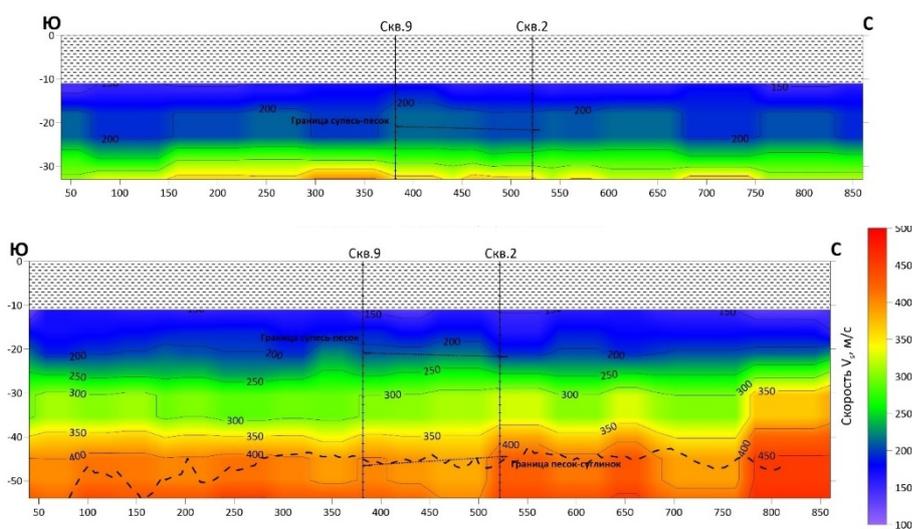


Рисунок 3.1.3 Разрез распределения скоростей распространения поперечных волн, полученный в результате обработки данных методом MASW. Пунктирной линией выделена граница, полученная способом  $t_0$

### 3.2 Проверка избыточности системы наблюдения

Поскольку на площадке ЛСП «А» использовалась сети наблюдения с разным шагом между ПП, то был выполнен анализ избыточности системы наблюдения. За основу был взят центральный субмеридиональный профиль с различными шагами между ПП:

- а) Шаг 75 м;
- б) Шаг 150 м;
- в) Шаг 300 м;
- г) Шаг 450 м;
- д) Шаг 900 м.

Системы наблюдений с более мелким шагом не использовались при анализе, так как такие шаги между ПП не могли наблюдаться на протяжении всего профиля.

Проверка избыточности системы наблюдения выполнялась на основании проверки результатов сейсмической томографии. На рисунке 3.2.1 представлен разрез распределения скоростей продольных волн при использовании всех ПП на профиле. На рисунках 3.2.2-3.2.6 представлены результаты обработки данных при разном шаге между ПП.

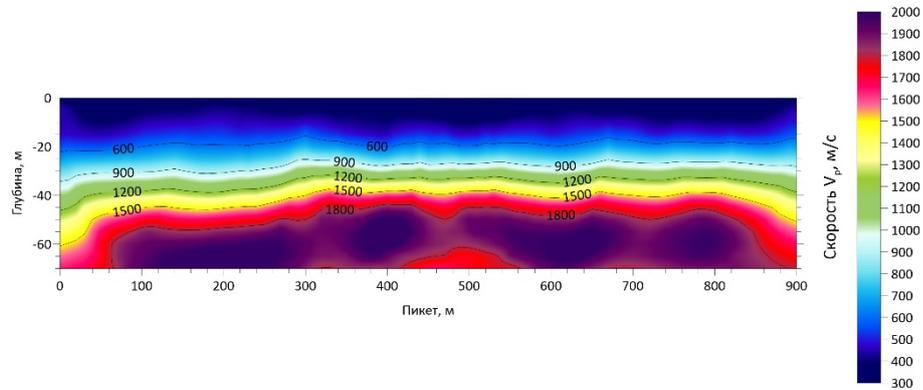


Рисунок 3.2.1 Разрез распределения скоростей продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии при использовании всех ПП на профиле

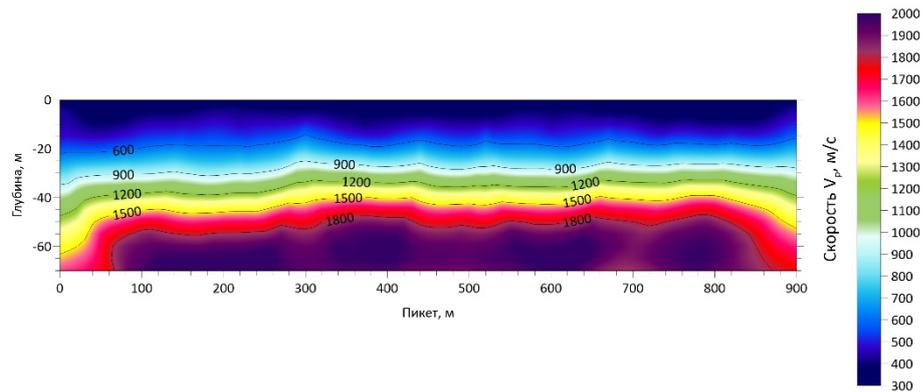


Рисунок 3.2.2 Разрез распределения скоростей продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии при использовании ПП с шагом 75 м

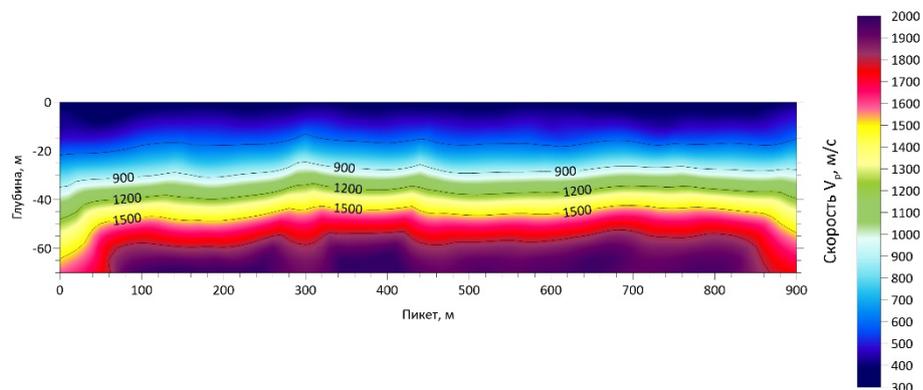


Рисунок 3.2.3 Разрез распределения скоростей продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии при использовании ПП с шагом 150 м

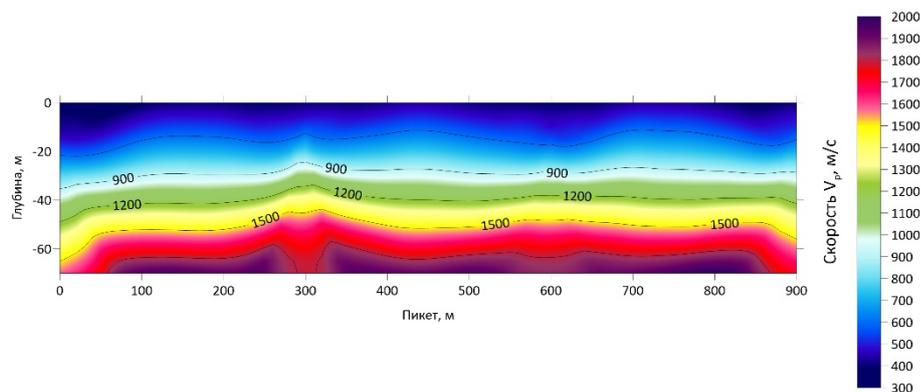


Рисунок 3.2.4 Разрез распределения скоростей продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии при использовании ПП с шагом 300 м

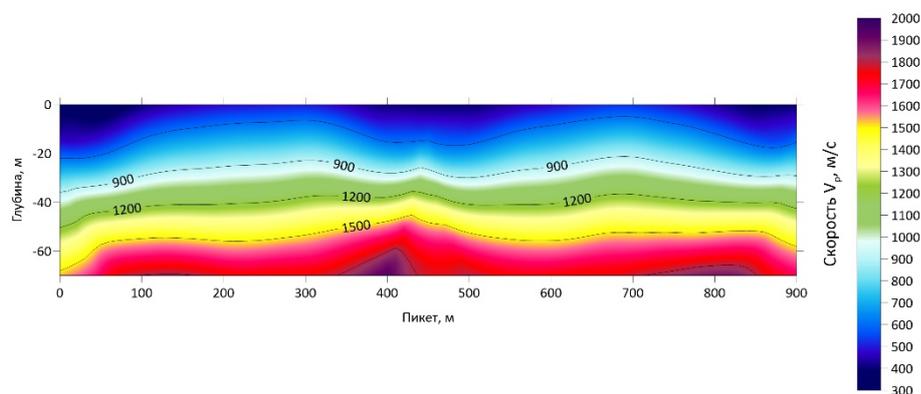


Рисунок 3.2.5 Разрез распределения скоростей продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии при использовании ПП с шагом 450 м

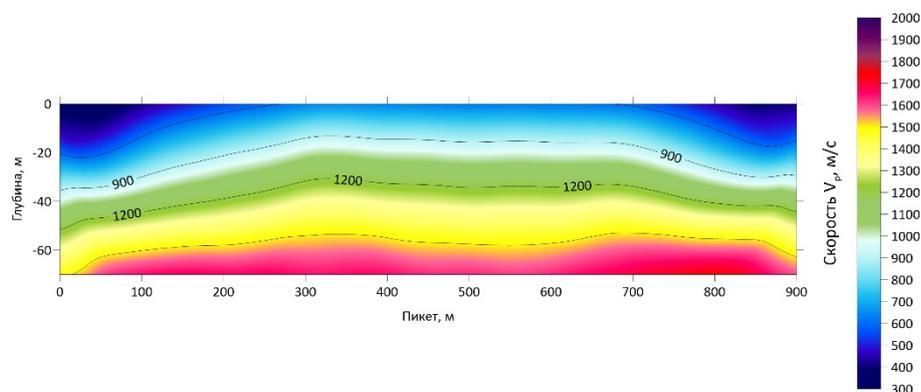


Рисунок 3.2.6 Разрез распределения скоростей продольных волн, полученный в результате сейсмической томографии при использовании ПП с шагом 900 м

При сравнении полученных результатов можно сделать вывод о схожести результатов томографии при шаге между ПП равном 75 м и при томографии, использующей все ПП. В свою результат при шаге 150 м также даёт достаточно схожие результаты. Скоростные разрезы, полученные при больших шагах между ПП, уже не настолько точные и не позволяют выделить локальные неоднородности в среде.

Анализ избыточности системы наблюдения с помощью обработки методом MASW не выполнялся из соображений, что база наблюдений данным методом должна

выбираться из принципа равномерности. То есть центры приемных расстановок должны быть расположены таким образом, чтобы расстояние между ними было постоянной величиной. Поскольку при анализе результатов сейсмотомографии были выделены две системы наблюдения с шагом 75 и 150 м между ПП, то база наблюдений методом MASW должна равняться 37.5 и 75 м соответственно. Такая приемная расстановка позволит распределить результаты инверсии вышеуказанным методом с шагом 37.5 и 75 м соответственно.

Также были проанализированы результаты 3D сейсмотографии при использовании всех ПП и ПП с шагом 150 м. Результаты представлены на рисунках 3.2.7-3.2.10. При сравнении результатов на рисунках 3.2.8 и 3.2.10 можно увидеть наличие высокоскоростной аномалии в центральной части модели с использованием всех ПП. На скоростном кубе с использованием равномерной сети наблюдения такая аномалия не наблюдается.

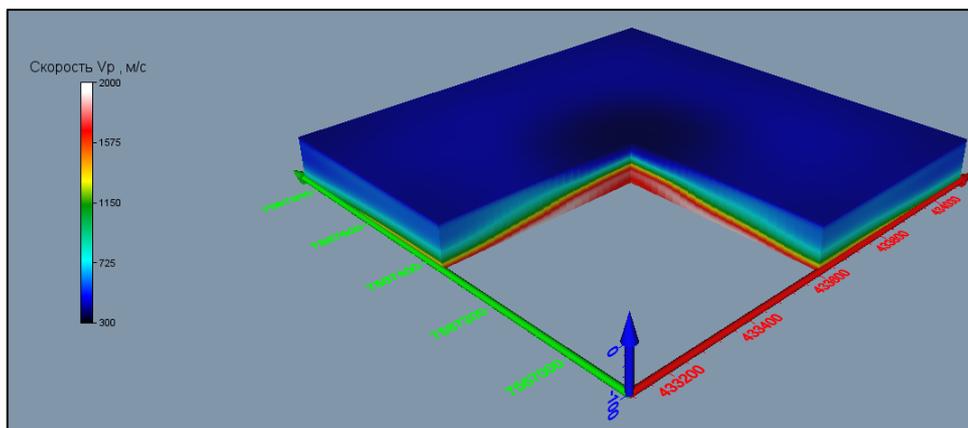


Рисунок 3.2.7 Результат площадной обработки данных способом сейсмической томографии по системе наблюдений с использованием всех ПП

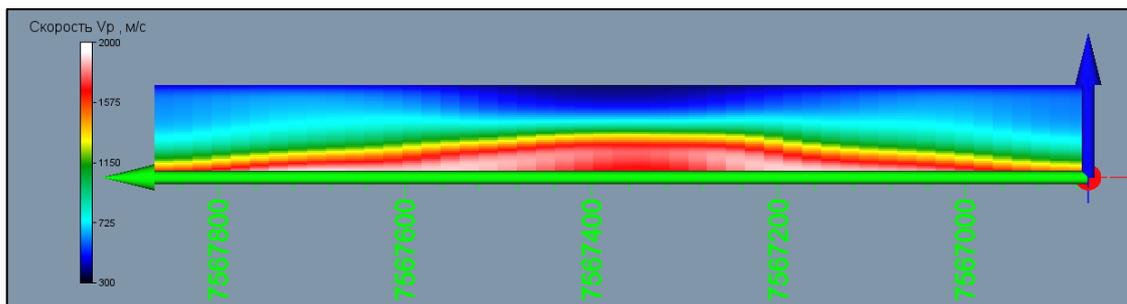


Рисунок 3.2.8 Результат площадной обработки данных способом сейсмической томографии по системе наблюдений с использованием всех ПП. Вид сбоку на центральный субмеридиональный профиль

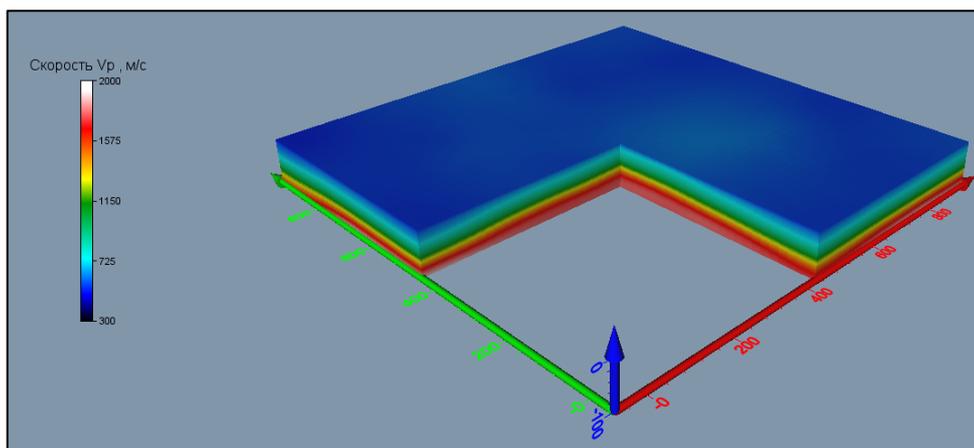


Рисунок 3.2.9 Результат площадной обработки данных способом сейсмической томографии по системе наблюдений с использованием ПП с шагом 150 м

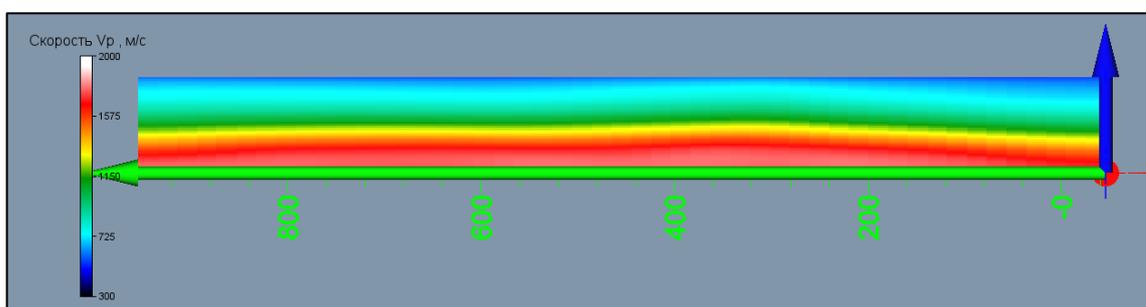


Рисунок 3.2.10 Результат площадной обработки данных способом сейсмической томографии по системе наблюдений с использованием ПП с шагом 150 м. Вид сбоку на центральный субмеридиональный профиль

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был сделан вывод о достаточно высокой эффективности использования донных систем регистрации при проведении инженерно-геофизических работ на акваториях в условиях газонасыщенных грунтов. На площадке ЛСП «А» первая инженерно-геологическая граница выделяется по изолиниям  $V_p=0.5$  км/с и  $V_s=0.2-0.25$  км/с, вторая граница выделяется по изолинии  $V_p=1.55$  км/с. На площадке ЛСП «БЖ» первой границе соответствует изолинии  $V_p=0.9$  км/с, второй границе соответствуют изолинии  $V_p=1.2$  км/с и  $V_s=0.4$  км/с.

В качестве рекомендаций при проведении исследований с применением донных станций в схожих условиях следует выделить следующие пункты:

- а) Возбуждение колебаний с использованием низкочастотных источников сигнала (пневмопушка);
- б) Использование равномерной сети наблюдений с шагом 75 или 150 м;
- в) Использование «вторых» вступлений преломленных волн для обработки данных МПВ способами сейсмической томографии и  $t_0$ ;
- г) Выполнение обработки данных не только профильными методами, но и площадными (3D сейсмотомография);
- д) Сопровождение инженерно-геофизических работ бурением с целью точной увязки получаемых результатов.

Несмотря на доказанную эффективность предлагаемой технологии работ полученная высокая точность связана с наличием скважин на исследуемых площадках. Таким образом, данная технология должна выполняться в комплексе с другими геофизическими методами исследования ВЧР. Важным аспектом является наличие априорной геологической информации о строении изучаемого водного бассейна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гил Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985., 509 с.
2. Гурвич И.И., Боганик П.Н. Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980., 551 с.
3. Половков В.В. Совместное использование преломленных и отраженных волн для построения глубинно-скоростной модели среды. Диссертация. СПб., Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", 2012
4. Потемка, А.К., Белов М.В., Половков В.В. Сейсмические наблюдения с донным оборудованием для решения задач инженерных геологических изысканий на предельном мелководье // Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)": Сборник, Москва, 26–30 октября 2020 года. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020, С.422-424.
5. Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н., Старовойтов А.В., Пирогова А.С., Корост С.Р., Ошкин А.Н., Потемка А.К. Характеристика газонасыщенных отложений Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустических и литолого-геохимических исследований // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. №1. С.107-114
6. Яновская Т.Б., Порохова Л.Н. Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004, 214 с.
7. Dash R., Spence G. P-wave and S-wave velocity structure of northern Cascadia margin gas hydrates // *Geophysical Journal International*. 2011. V.187. №. 3. P.1363-1377.
8. Hou S., Zheng D., Miao X.G., Haacke R.R. Multi-modal Surface Wave Inversion and Application to North Sea OBN Data // EAGE, ext. abstracts. 2016.
9. Osdal, B., Zadeh, H. M., Guttormsen, M. S., Aronsen, H. A., Cannavo, D. C., & Øxnevad, G. O. Benefit of OBS PP and PS Data for Structural Interpretation on Snøhvit and Albatross Fields // 78th EAGE Conference and Exhibition 2016.
10. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // *Geophysics*. 1999. V.64. №. 3. P.800-808.
11. Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods // *The Leading Edge*. 2007. V.26. №.1. P.60-64.
12. Polovkov V.V. Complexing of the Reflected and Refracted Waves in the Processing and Interpretation of Multichannel Marine Seismic Data // EAGE, Saint-Petersburg – 2012, 5-th International Geological and Geophysical Conference and Exhibition, Ext. abs. 2012.

13. Polovkov V.V., Nikitin A.S., Popov D.A., Maev P.A., Birukov E.A., Tokarev M.Yu. Gas-saturated sediments study in the upper part of the geological medium using ocean bottom nodes // Engineering and Mining Geophysics 2018 - 14th Conference and Exhibition, Almaty, 23–27 april 2018.
14. Roslov Y.V., Polovkov V.V. Prestack Depth Migration and Velocity Model Derived from First Break Tomography at Long Offsets // EAGE, Saint-Petersburg – 2010, 4-th International Geological and Geophysical Conference and Exhibition. Ext. abs. 2010.
15. Sha, Z. B., Zhang, M., Zhang, G. X., Liang, J. Q., & Su, P. B. Using 4C OBS to reveal the distribution and velocity attributes of gas hydrates at the northern continental slope of South China Sea // Applied Geophysics. 2015. V.12. №4. P.555-563.
16. Socco L.V., Strobbia C. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial // Near surface geophysics. 2004. V.2. №4. P.165-185.
17. <https://www.esri.com/>
18. <https://www.gazprom.ru/projects/kamennomyskoe/>
19. <https://geotomo.com/>
20. <https://www.goldensoftware.com/>
21. <https://radexpro.com/>
22. <http://www.tesseral-geo.com/>
23. <http://www.xgeo.ru/>
24. Полевой отчет инженерных исследований на морские участки по объекту «Обустройство газового месторождения Каменномысское-море». М., ООО «СПЛИТ», 2020.