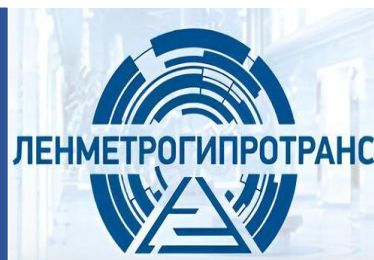


Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс»



Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных с целью изучения состояния заобделочного пространства, на примере участка нижегородского метрополитена

Автор: **РАХИМОВ Э.А.**, младший научный сотрудник

г. Санкт-Петербург
2025

Актуальность работы



- 1) 5 декабря 1995 года - разрыв в Петербургском метрополитене. Авария на перегоне между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества». На площади Мужества и прилегающих городских магистралях образовались провалы, треснули стены домов и наземных сооружений.
- 2) 18 ноября 1989 года - через три дня после открытия регулярного движения до станций "Комсомольская" и "Парк культуры" - произошел массовый прорыв грунта в части тоннеля. Движение поездов до этих станций было временно перекрыто.

Результат аварии в Петербургском метрополитене. Авария на перегоне между станциями «Лесная» и «Площадь Мужества»

Краткие сведения о районе работ

- Обследования тоннельной обделки проводилось на одном из перегонов Нижегородского метрополитена
- Категория сложности объекта – I (особо опасный, технически сложный объект), соответствует повышенному уровню ответственности
- Верхняя часть разреза в основном сложена песком мелкой и средней крупности, а также суглинками. Согласно априорной геологической информации и скважинным данным в разрезе встречаются зоны разуплотнения пород и суффозионные полости

Номер слоя	Описание	Литология	Мощность
1	Песок мелкий/средней крупности		7-10
2	Суглинок		5-7
3	Суглинок уплотнённый		3-5

Геологический разрез верхней части разреза составленный по скважине

Методика выполнения работ

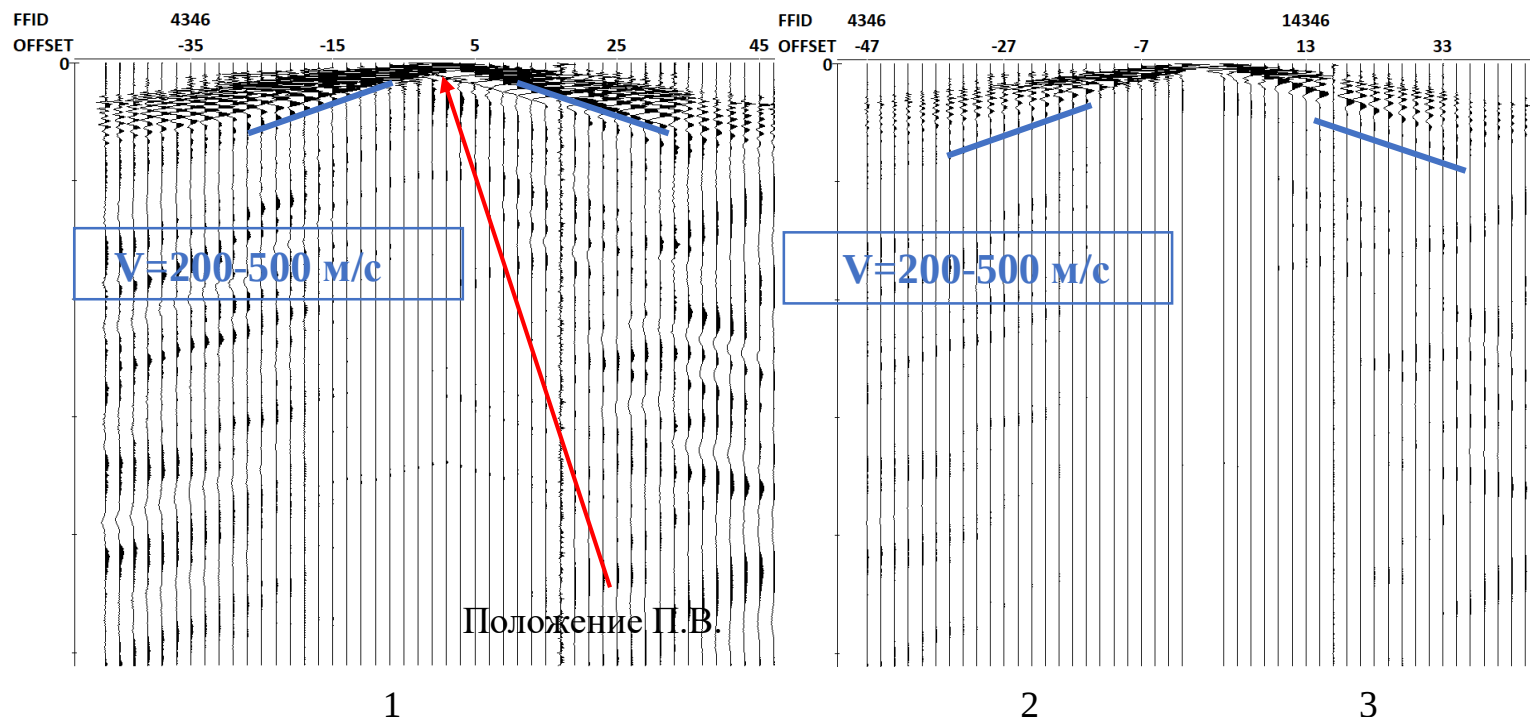
- Геофизический метод - МПВ
- В работе использовалась сейсмостанция ЭЛЛИСС-3
- Количество каналов – 48
- Методика «встречных» и «нагоняющих» годографов
- Шаг ПП- 2 метра
- Методика выполнения работ позволяет обработать сейсмограммы по технологии MASW



Выполнение работ методом МПВ. Красными стрелками показано положение датчиков

Обработка полученных данных по технологии MASW

- Метод многоканального анализа поверхностных волн (англ. “Multichannel Analysis of Surface Waves” – сокр. MASW) заключается в обработке данных поверхностных волн с целью изучения верхней части разреза. Метод позволяет восстановить распределение скоростей поперечных (S) волн. Используется фланговая система наблюдения.



Этап 1. Форматирование смешанной системы наблюдения в фланговую.
Синими линиями показаны поверхностные волны на сейсмограммах

1. Форматирование смешанной системы наблюдения в фланговую

2. Выделение поверхностных волн

3. Выбор оптимальной длины приёмной линии

4. Расчет и пикировка дисперсионных изображений

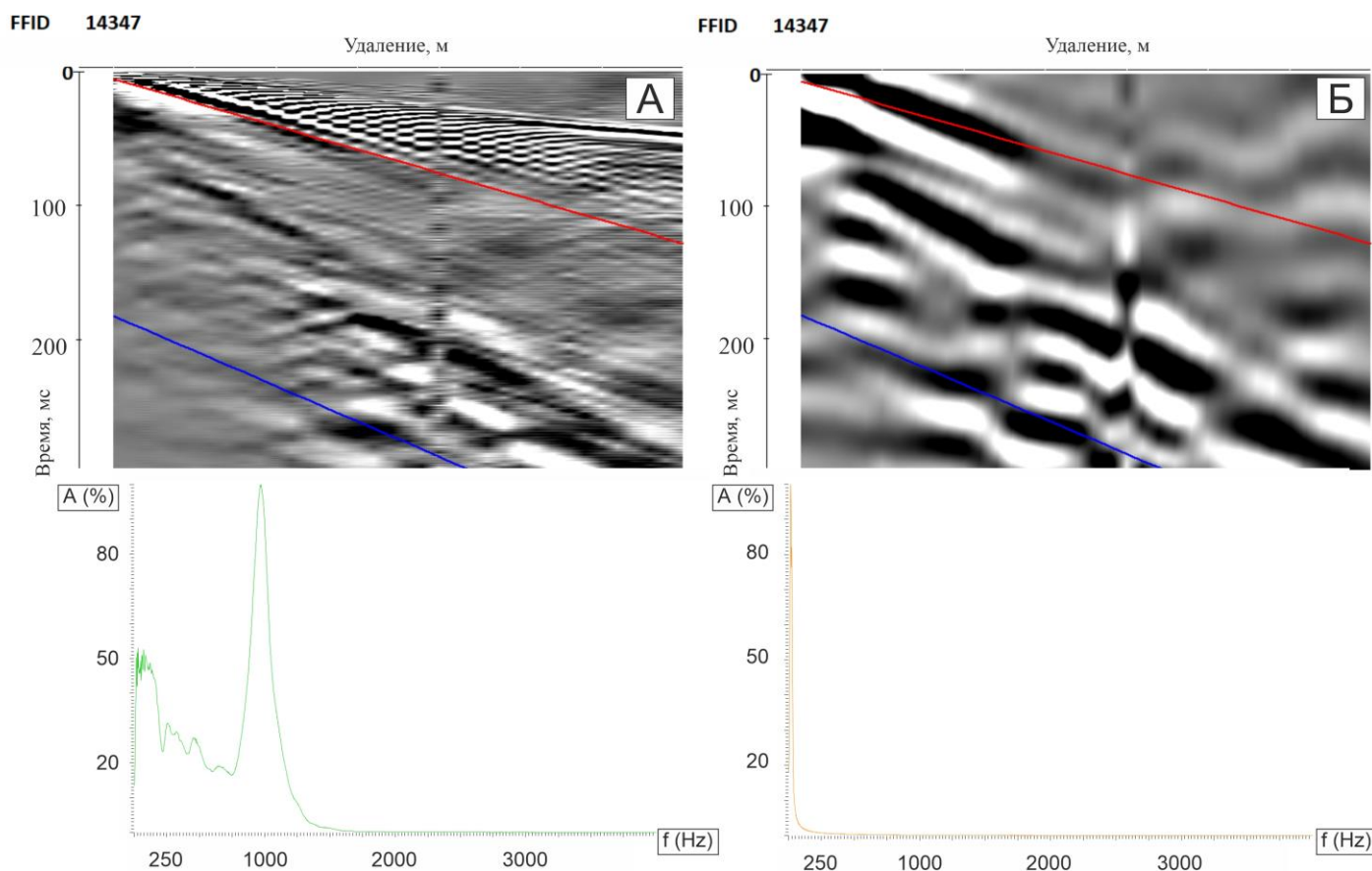
5. Определение параметров начальной модели

6. Инверсия. Получение скоростного разреза V_s

Этапы выполнения обработки

Обработка полученных данных по технологии MASW

- Для выделения поверхностных волн применялась процедура полосовой фильтрации и мьютинга.
- В результате выполненных процедур удалось выделить целевой сигнал

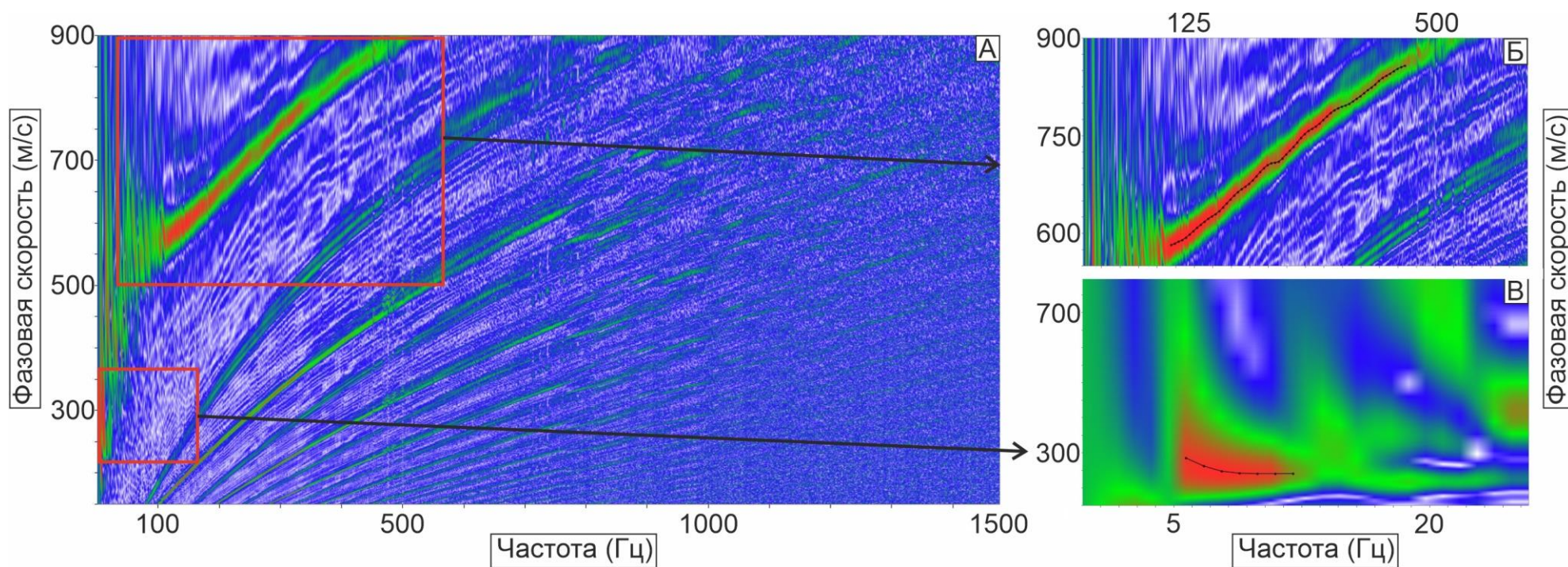


2. Выделение поверхностных волн

Этап 2. Выделение поверхностных волн. Цветом нанесены линии мьютинга

Обработка полученных данных по технологии MASW

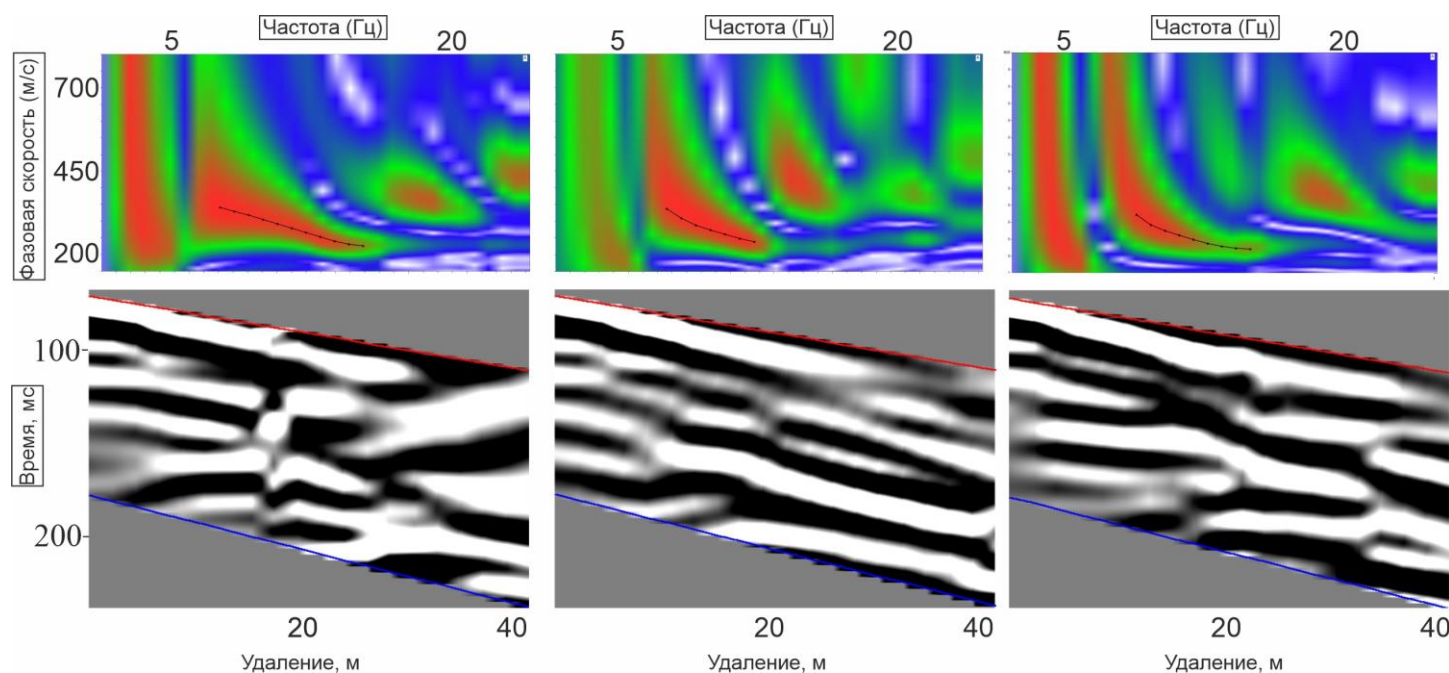
- На дисперсионных изображениях по причине инверсионного разреза (наличие железобетонной обделки), присутствует как низкочастотная часть моды, несущая информацию о глубинных частях разреза, так и высокочастотная область, несущая информацию о верхних частях разреза. В нашем случае целевой сигнал поверхностных волн находится в диапазоне частот от 8 до 17 Гц и имеет кажущиеся скорости в диапазоне от 200 до 350 м/с для фундаментальной моды



Присутствие на дисперсионных изображениях низкочастотной и высокочастотной моды. Черными точками показана пикировка дисперсионных изображений

Обработка полученных данных по технологии MASW

- Выбор оптимальной длины приемной линии определялся опытным путем.



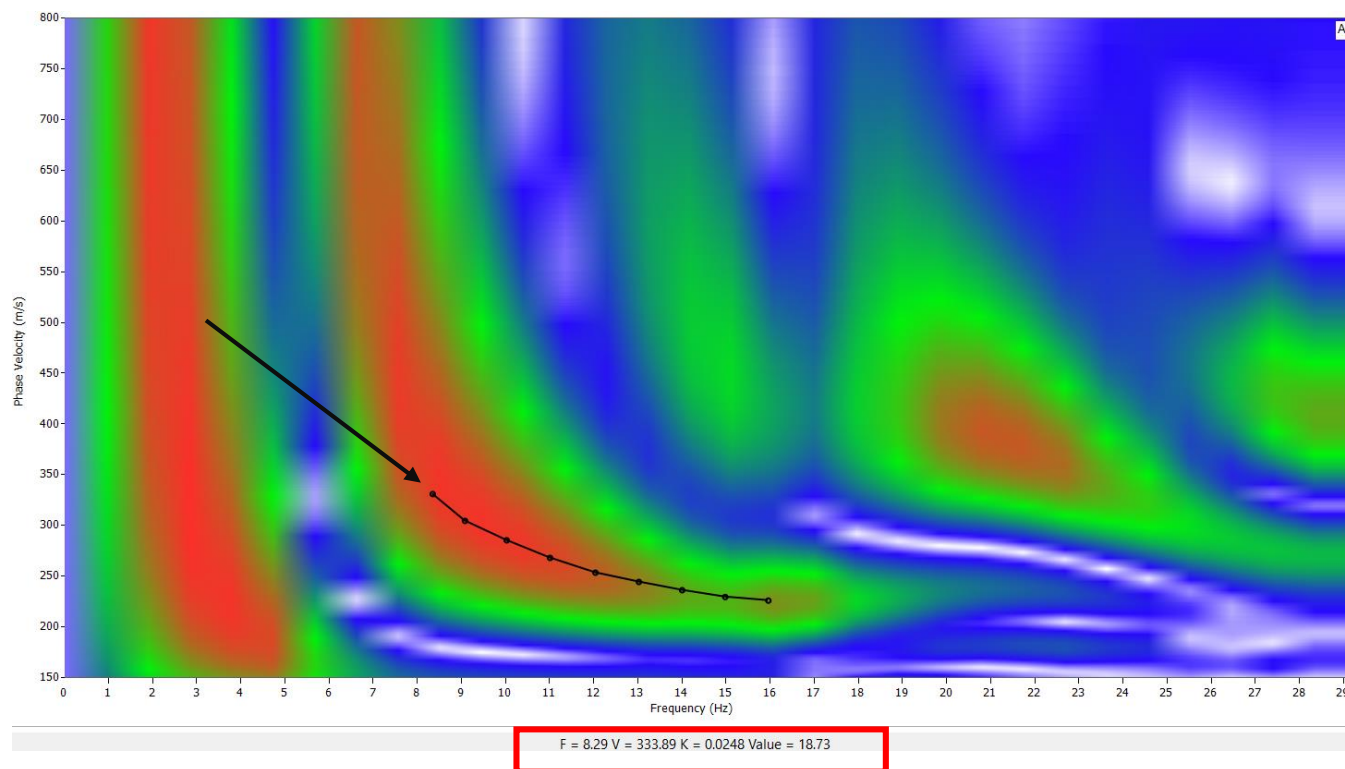
3. Выбор оптимальной длины приёмной линии

4. Расчет и пикировка дисперсионных изображений

Этап 3-4. Выделение поверхностных волн. Цветом нанесены линии мьютинга

Обработка полученных данных по технологии MASW

- Глубина модели - 20 м.
- Значения плотности и коэффициента Пуассона - 1,9 г/см³ и 0,46 соответственно.
- Количество слоёв – 4
- Для надежности решения обратной задачи было выбрано 7 итераций. На всех пикетах среднеквадратическая невязка не превышала 2 м/с



$$\frac{L}{2} = \frac{v \times T}{2} = \frac{v \times \frac{1}{f}}{2} \quad (1)$$
$$\frac{v \times \frac{1}{f}}{2} \approx \frac{334 \times \frac{1}{8.3}}{2} \approx 20 \text{ м}$$

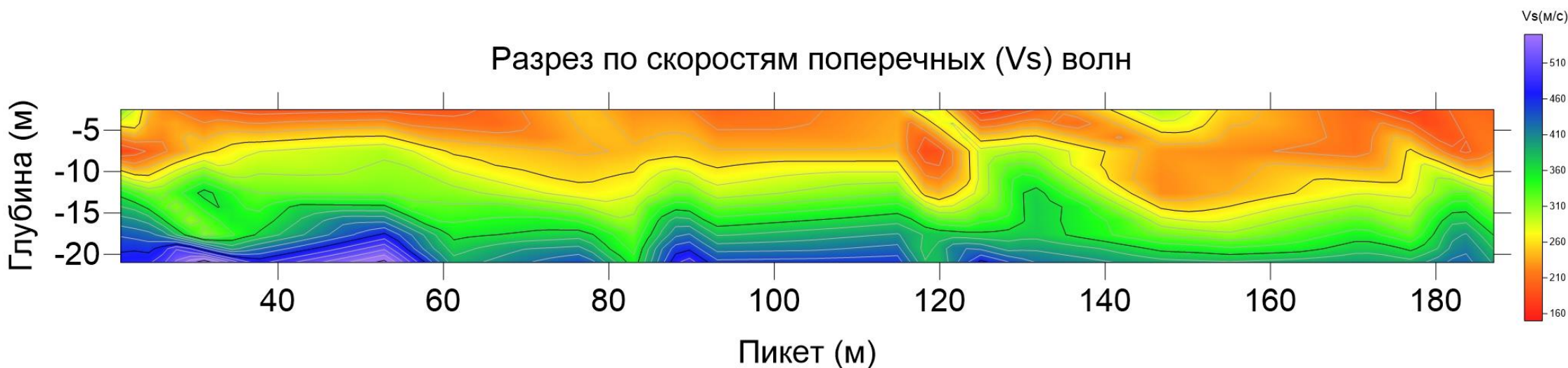
5. Определение параметров начальной модели

6. Инверсия. Получение скоростного разреза Vs

Этап 5-6. Пример дисперсионного изображения по профилю, красным контуром выделены значение частоты и фазовой скорости точки пикировки, показанной стрелкой

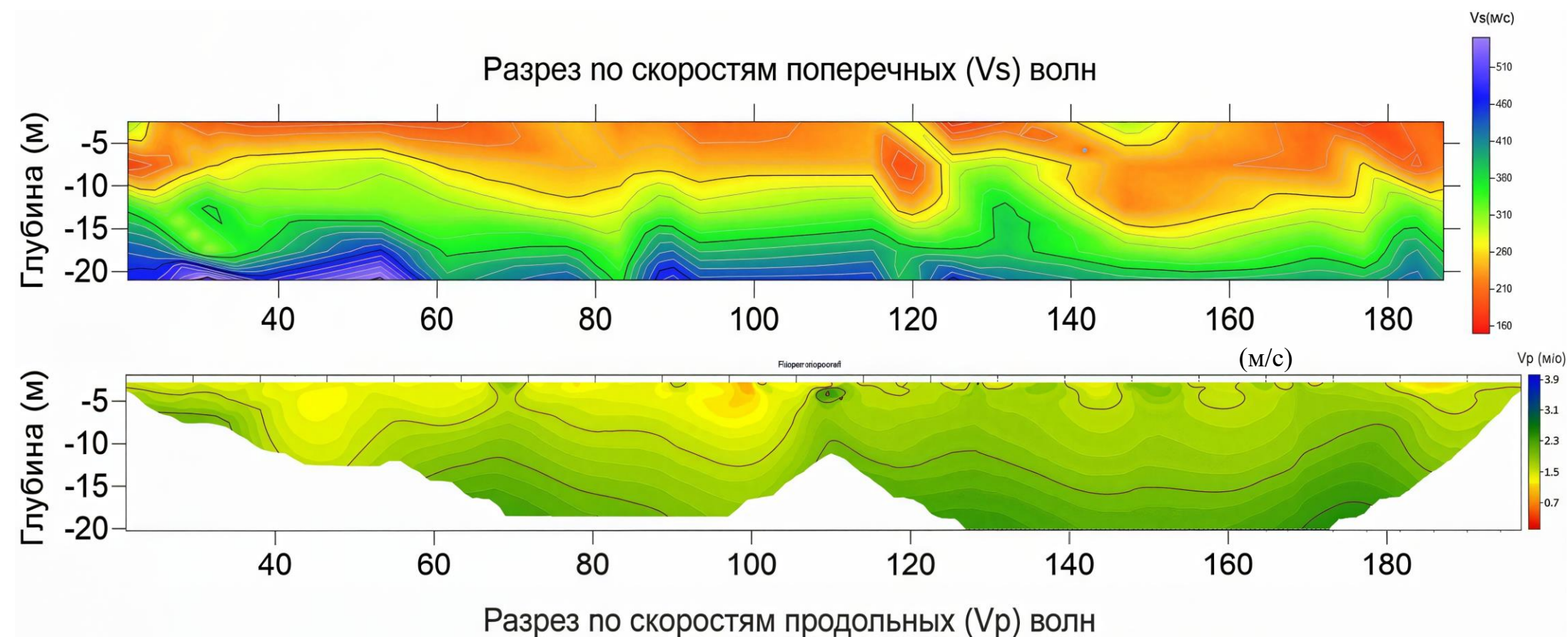
Обработка полученных данных по технологии MASW

- По результатам инверсии в верхней части разреза можно выделить 3 слоя.
- До глубины 10 м – неплотные пески со скоростями поперечных волн (V_s) $\sim 0,16 - 0,26$ км/с
- Ниже глубины 10 м и до ~ 17 м выделяются породы: суглинки со скоростями поперечных волн (V_s) $\sim 0,26 - 0,36$ км/с
- Далее встречаются более плотные суглинки со скоростями поперечных волн (V_s) $\sim 0,36 - 0,52$ км/с

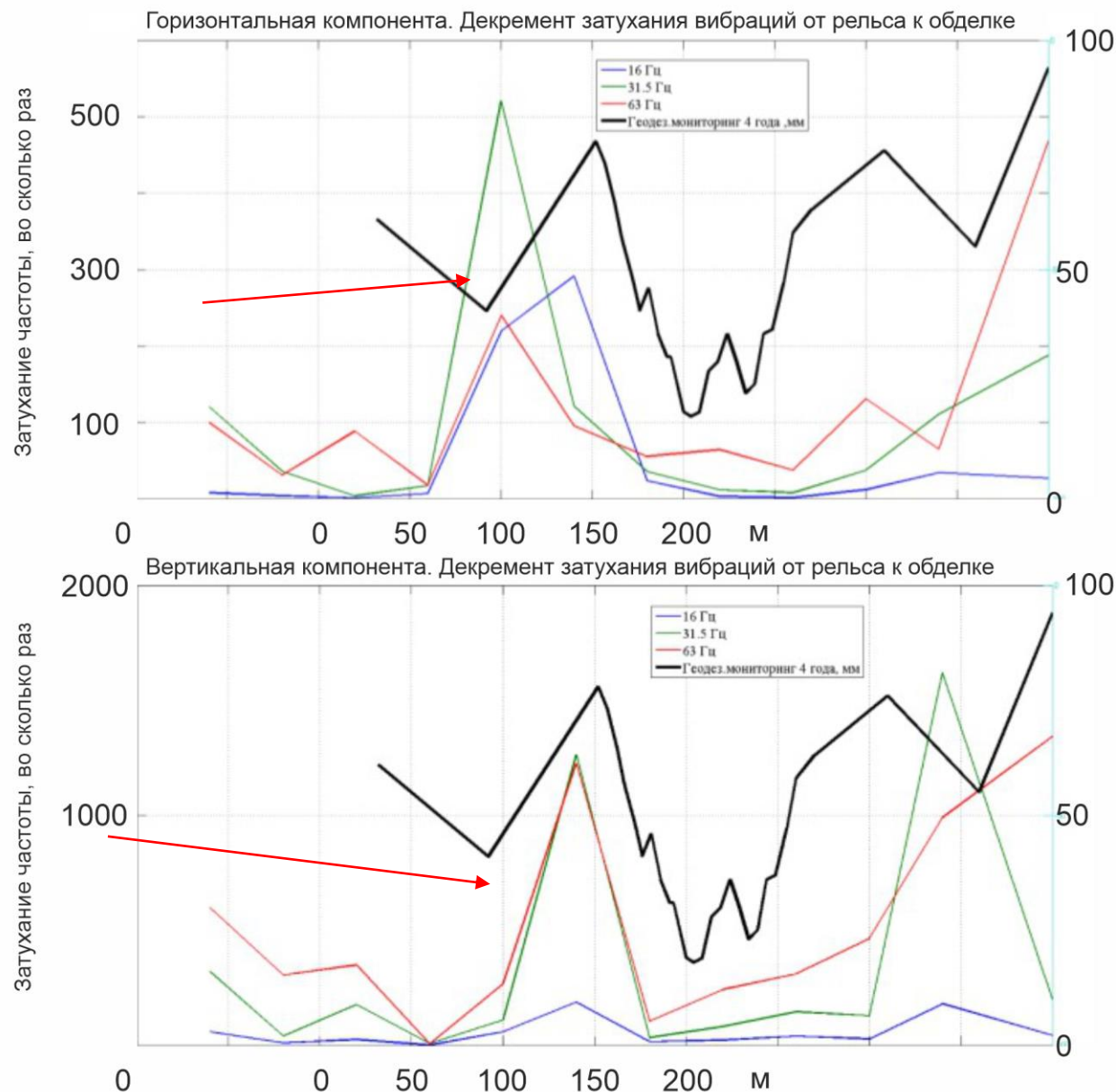


Разрез поперечной скорости, полученный в результате обработки по технологии MASW

Сравнение результатов MASW с другими методами



Сравнение результатов MASW с другими методами



Графики затухания и величины осадок тоннеля. Стрелкой показана область высоких значений затухания частот для исследуемого участка

Выводы

- В результате проделанной работы удалось выработать оптимальную методику обработки данных в рамках метода MASW, зарегистрированных с целью изучения состояния заобделочного пространства. Данные методические рекомендации могут быть полезными для реализации других проектов.
- Результат обработки, полученный методом MASW, можно комбинировать с результатами, полученными на преломленных волнах. Такой подход даёт возможность оценить деформационно-прочностные свойства пород для прогноза геологического строения и оценки возможных нагрузок на грунты при эксплуатации подземных сооружений. Извлечение деформационно-прочностных характеристик по результатам комбинированной обработки является предметом будущих исследований.
- Результаты полученные методом MASW демонстрируют высокую корреляцию с другими методами мониторинга. Так, разрезы полученные по поперечным и продольным волнам отличаются синхронными понижениями скоростей, что свидетельствует о наличии ослабленных/разуплотнённых зон в верхней части разреза. Аналогичная картина наблюдается по данным геодезического мониторинга и графикам вибромониторинга.

Спасибо за внимание!

Список литературы.

1. Бойко О. В. Определение упругих характеристик низкоскоростных пород, перекрытых высокоскоростным слоем обделки тоннеля, по материалам сейсморазведки: дис. к.г.-м.н.. наук: 25.00.10- СПб., 2015. - 135 с.
2. Дорохин К.А. Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн: дис. к. техн. наук: 25.00.20. - СПб., 2017. - 196 с.
3. Дорохин К.А. Оценка геодинамического состояния массива горных пород методом дисперсионного анализа поверхностных волн // ГеоЕвразия-2018. 2018. с. 648-653.
4. Половков В.В., Терёхина Я.Е., Рахимов Э.А., А.А. Кудинов, А.В. Пономаренко А.В., Соловьёва М.А., Буланова И.А., Токарев М.Ю., Горбачев С.В. Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных при сейсморазведочных работах 3D МОВ-ОГТ с буксируемым оборудованием с целью изучения строения верхней части разреза шельфа Печорского моря // Геофизика, 2024. №2. С. 52-57.
5. Половков В.В., Рахимов Э.А., Кудинов А.А. Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных при сейсморазведочных работах 3D МОВ-ОГТ с буксируемым оборудованием с целью изучения строения верхней части разреза шельфа Печорского моря // ГеоЕвразия-2024. 2024. с. 100-103

Цель геофизического мониторинга

- Целью геофизического мониторинга является выявление технического состояния тоннельной обделки (своевременное выявление негативных процессов).

Исходя из поставленной цели, необходимо провести следующие работы:

- Геофизическое обследование состояния затоннельного пространства:
- -обнаружение и оконтуривание геологических структур и процессов, влияющих на деформации обделки тоннеля на глубину до 10 м от внутреннего контура обделки;
- -определение состояния вмещающего грунтового массива на контакте с обделкой, наличия пустот за обделкой;
- -определение фактических деформационно-прочностных свойств вмещающего грунтового массива и его структуры, обводненность;

Выбор базы наблюдения

