

# Приповерхностные исследования области свалки доменного шлака с использованием поверхностных волн Релея

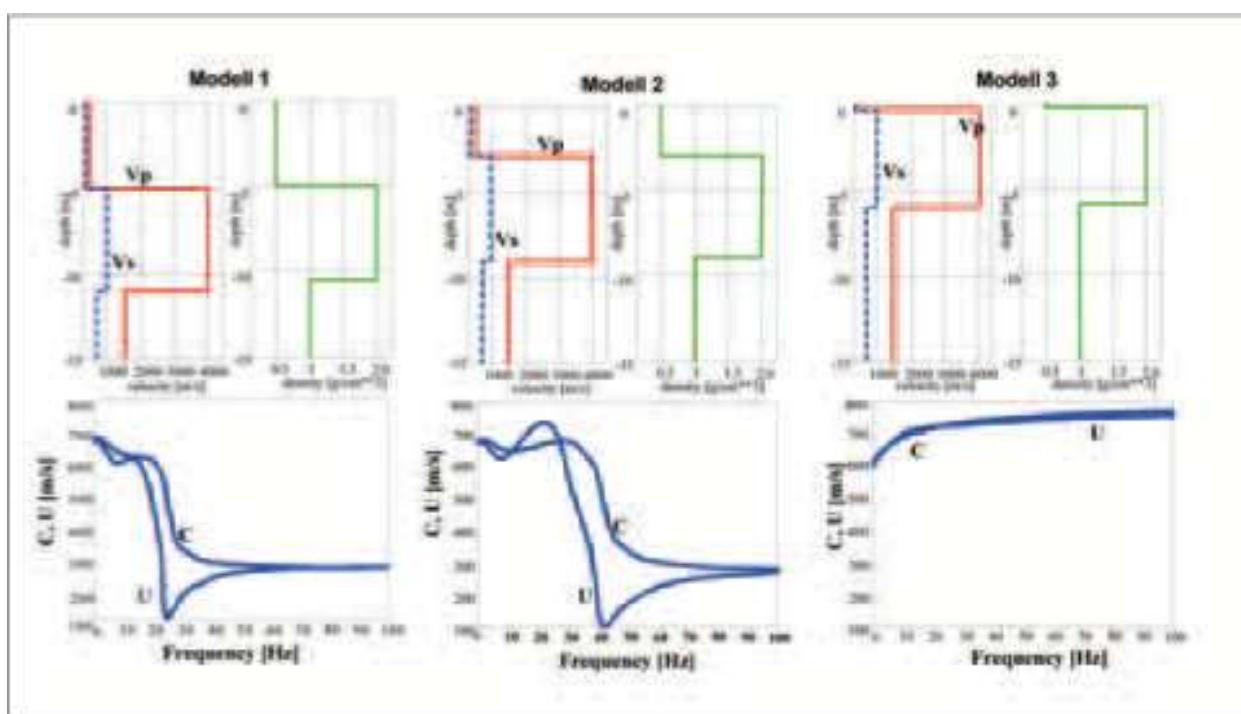
Near surface investigations over a disposal site for blast-furnace slag using Rayleigh surface waves

**Dirk Orlowsky, Christoph Witte и Bodo Lehmann из DMT, Германия, описывают относительно простое применение приповерхностной сейсморазведки для определения потенциальной неустойчивости на строительной площадке некогда используемой для свалки доменного шлака.**

Поверхностные и каналовые волны используются для исследования латеральных изменений геологической среды в течение многих лет. Поверхностные волны распространяются по поверхности Земли и их амплитуда затухает с глубиной. Вследствие амплитудного затухания в одном пространственном измерении, распространение поверхностных волн ограничено двумя пространственными измерениями, и энергия фактически приурочена к поверхности Земли. Это ведет к тому, что форма сигнала характеризуется высокими амплитудами у поверхности, и поэтому поверхностные волны очень чувствительны к изменению приповерхностного строения среды.

В упругих средах наблюдаются два различных типа поверхностных волн, волны Лява и волны Релея, характеризующиеся различными направлениями колебания частиц. Каналовые волны, которые

наблюдаются в низкоскоростных слоях, очень похожи на поверхность волны. Знания о поверхностных и каналовых волнах в прошлых четырех десятилетиях привели к разработке сейсморазведки на каналовых волнах (метод СКВ) (Dresden и Ruter, 1994) для обнаружения нарушений сплошности среды. В сейсмологии поверхностные волны использовались в течение многих десятилетий для исследования земной коры и строения верхней мантии (Seidl и Muller, 1997; Keilis-Borok, 1989; Nakanishi, 1993). Однако геофизики всего несколько лет назад начали приспособливать методы сейсмологии на каналовых волнах и разрабатывать новые стандартные методы (Park, Miller и Xia, 1999) для исследования приповерхностного строения Земли на поверхностных волнах. Это привело к разработке сейсмического метода на поверхностных волнах (метод СПВ) для приповерхностных исследований. В этом контексте, выражение «приповерхностное» обозначает максимальные глубины исследования порядка 20 м.



**Рис. 1.** Дисперсионные кривые групповой ( $U$ ) и фазовой скорости ( $C$ ) волн Релея (первая мода), рассчитанные для случая предполагаемого строения среды в области исследования.



Рис. 2.

В данной статье описан простой метод определения скорости волн Рэлея для описания приповерхностного строения среды. Скорость волн Рэлея является функцией частоты для слоистой среды и таким образом, волны характеризуются дисперсией. Существует необходимость выделения двух типов скорости — фазовой и групповой. Для низких частот в слоистой среде, скорость волн Рэлея примерно равна скорости распространения поперечной волны в полупространстве, в то время как для высоких частот, скорость примерно равна скорости распространения поперечных волн в первом слое. В «нормальных» условиях скорость распространения поперечной волны растет с ростом глубины. Таким образом, высокочастотные волны Рэлея имеют меньшую скорость распространения, чем низкочастотные (нормальная дисперсия). Однако в некоторых случаях наблюдается обратная дисперсия, когда в среде имеет место инверсия скорости объемных волн.

В этом случае место свалки доменного шлака должно было быть восстановлено и использовано в качестве строительной площадки больших индустриальных складов. В течение периода свалки жидкий расплавленный шлак мог создать полости или включить в себя рыхлый материал, что может привести к неустойчивости почвы. Общая методика выявления и устранения этих полостей - уплотнение всей области с использованием разгоняемых падающих грузов. Однако вследствие того, что этот метод как вреден для окружающей среды из-за высокого шумового воздействия, так и неэффективен в затратах, предпочтение было отдано геофизическим методам обнаружения возможных слабых зон. Из-за физических свойств холодного доменного шлака (низкое удельное электрическое сопротивление, высокое содержание металла, высокая плотность), для получения корректных результатов могут применяться только сейсмические методы. При исследовании области проводился анализ распространения и дисперсионных характеристик поверхностных волн Рэлея. Ождалось, что скорости распространения продольных и поперечных волн в плотном шлаке будут примерно в два или три раза больше, чем в подстилающей почве. Таким образом, ожидалась обратная дисперсия фазовых скоростей поверхностных волн Рэлея.

#### Расчет дисперсионных кривых

Расчет дисперсионных кривых для фазовой скорости основан на алгоритме Thomson-Haskell (Haskell, 1953). В этом дисперсионном соотношении участвуют скорости

распространения продольных и поперечных волн, мощности слоев и отношения плотностей.

На рис. 1 приводятся три различных скоростных модели среды, ожидаемые в исследуемой области, а также соответствующие дисперсионные кривые групповой (U) и фазовой скорости (C) первой моды волн Рэлея. Все три модели описывают трехслойную среду, где скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн во втором слое намного выше, чем в первом и третьем слоях. В наших полевых наблюдениях данный слой определен как шлак. Кроме того, плотность шлака превышает плотность вмещающих пород.

Модели отличаются друг от друга тем, что глубина залегания шлака уменьшается от первой модели к третьей. Можно заметить, что, для различных глубин залегания шлака, дисперсионные кривые показывают обратную дисперсию в различных частотных диапазонах как для фазовой, так и для групповой скорости, то есть скорость растет с ростом частоты в различных частотных диапазонах. Для модели 3, весь частотный диапазон от 0 до 100 Гц показывает обратную дисперсию. Поэтому по результатам расчета дисперсионных кривых для модели 3 ожидается, что измерения скоростей волн Рэлея непосредственно над шлаком приведут к получению высоких скоростей для высоких частот. Если в шлаке присутствуют полости или рыхлый материал, то характеристика дисперсии изменится и скорости для некоторых частот упадут. Таким образом, неоднородности могут быть обнаружены расчетом карт скоростей волн Рэлея для различных частот. Это позволит получить информацию о различных интервалах глубин, а глубины неоднородностей могут быть оценены с точностью до половины длины волны Рэлея. Кроме того, из-за изменений скорости и плотности на неоднородностях, можно предположить, что поверхностные волны отражаются непосредственно на местах локализации неоднородностей. Поэтому обнаружение отражений поверхности волны также выполнено для ряда выбранных частот.

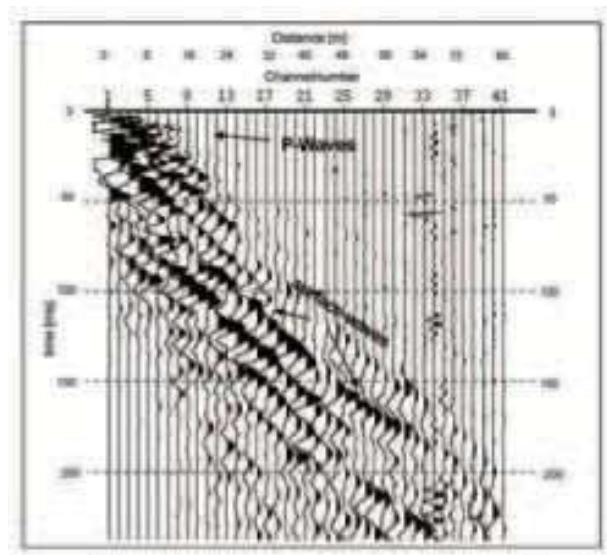
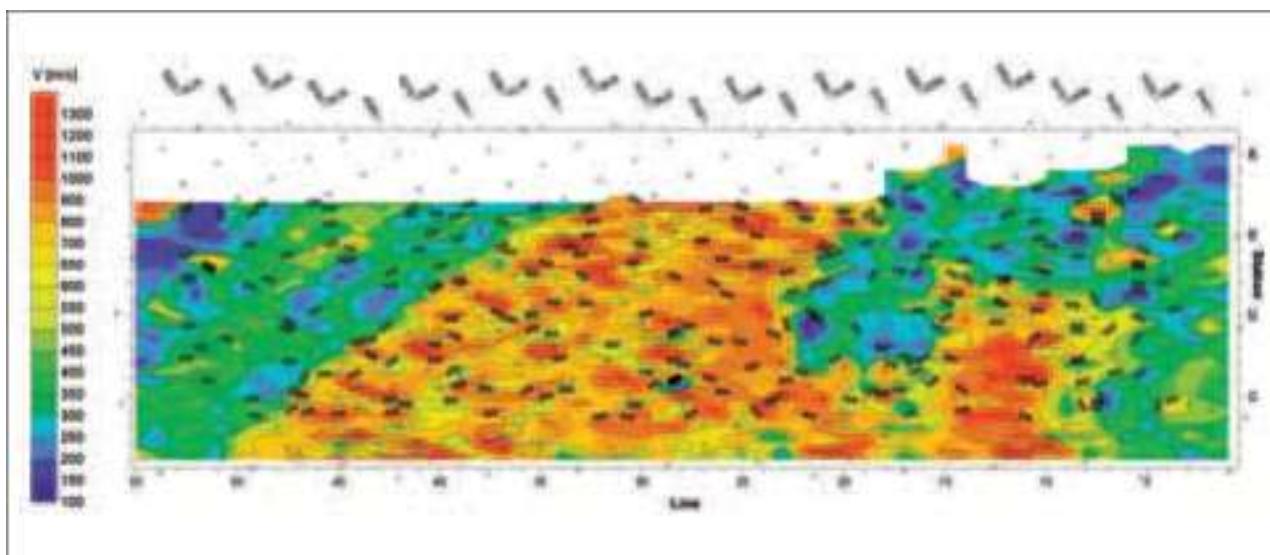
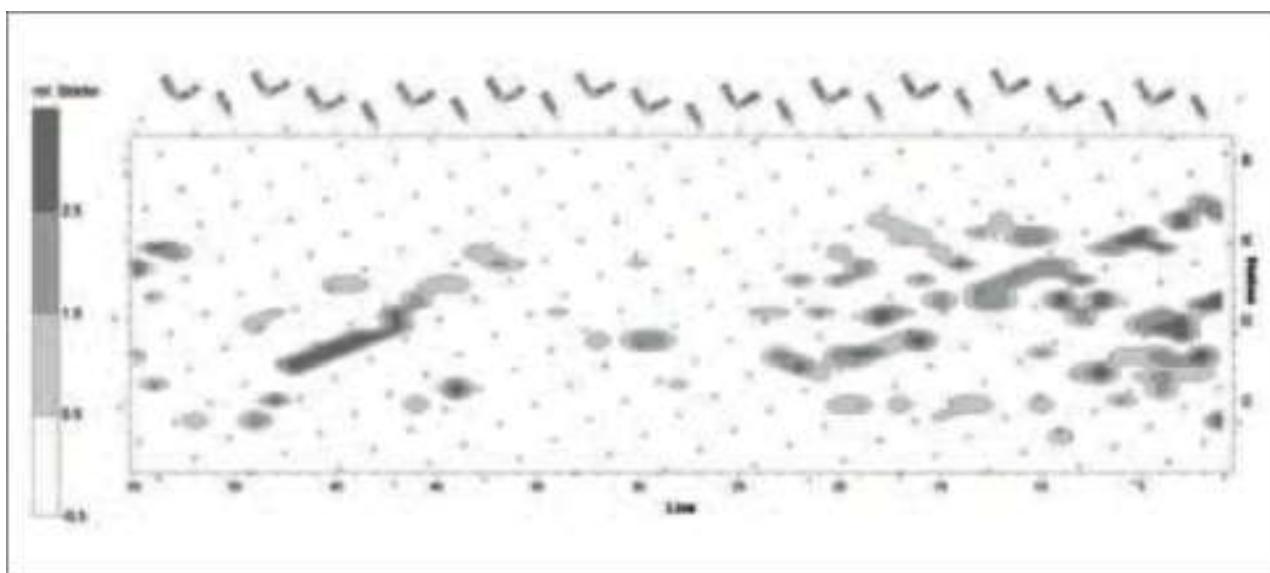


Рис. 3. Пример полевых данных: регистрация и возбуждение производились непосредственно в области свалки доменного шлака.



**Рис. 4.** Карта фазовой скорости поверхности волн Релея в исследуемой области для центральной частоты 75 Гц. Высокие скорости в шлаке могут быть легко отделены от низких скоростей в других образованиях.



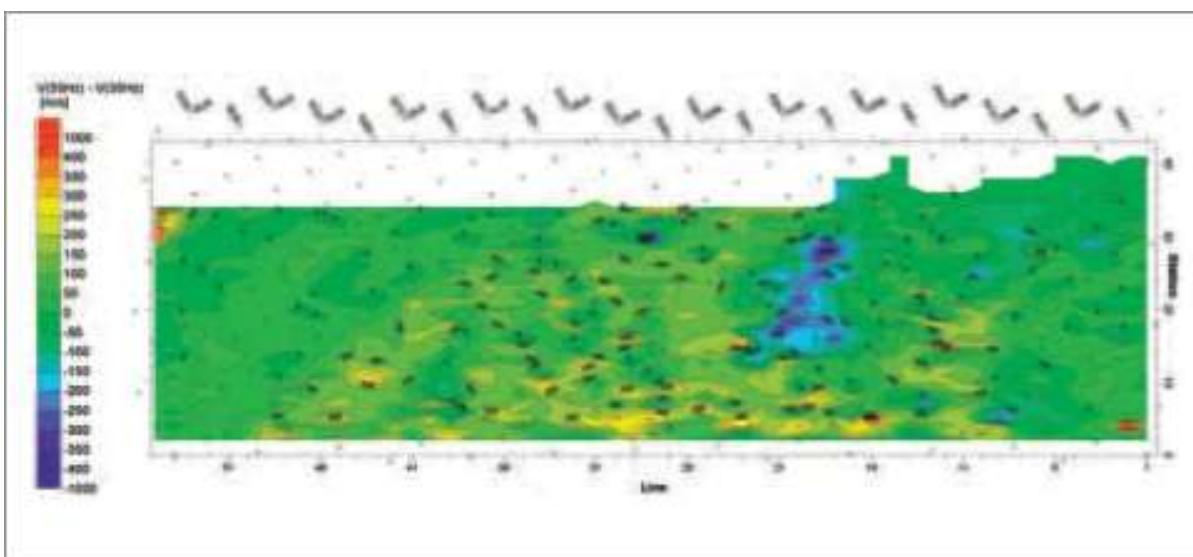
**Рис. 5.** Карта неоднородности поверхности волн Релея в исследуемой области для центральной частоты 35 Гц. Высокие значения относительных амплитуд неоднородностей соответствуют главным образом тем областям, где шлак отделен от остальных образований и это есть границы областей свалки.

### Полевые работы

Перед проведением сейсморазведочных работ проводилась геодезическая съемка с использованием дифференциальной системы спутниковой навигации Trimble по выбранным 55 профилям длиной 80 м. Расстояние между профилями составляло 5 м, шаг между сейсмоприемниками был выбран 2 м.

На рис. 2 приведена фотография полевых измерений, для которых были выбраны следующие параметры:

- Источник: сейсмическая кувалда (8 кг);
- Регистрация: накапливание — 4 удара.
- Шаг между приемниками: система summit, 41 канал, центральная расстановка на каждом профиле.
- Приемники: 28 Гц.
- Шаг: 4 м.
- Возбуждения: 2 м.
- Интервала дискретизации: 0.125 мс.
- Длина трассы: 500 мс.



**Рис. 6.** Карта разностей фазовой скорости поверхностных волн Релея в исследуемой области для частот от 35 и 55 Гц. Синие участки соответствуют областям с нормальной дисперсией, желтые и красные участки — областям с обратной дисперсией. Зеленые участки соответствуют областям с почти отсутствующей дисперсией для частот от 35 Гц до 55 Гц.

Контроль качества данных выполнялся в процессе измерений: наблюдались амплитуды поверхностных и продольных волн на экране компьютера. Качество данных поверхностных волн, которые были подробно исследованы, оказалось очень высоким, а данные продольных волн Р-волны, которые не использовались для обработки и интерпретации, коррелируются не очень хорошо (рис. 3).

При сейсмических наблюдениях в области свалки доменного шлака для возбуждения мощных поверхностных волн использовалась кувалда (8 кг). Желтые коробки представляют систему summit, которая в каждой коробке включает два канала.

### Обработка данных

Для получения карт скоростей поверхностных волн в исследуемой области использовался следующий граф обработки данных:

- Редактирование и фильтрация (узкополосная фильтрация по трем заданным частотам)
- Пикирование фаз поверхностной волны для различных частот и выносов
- Определение фазовых скоростей для различных частотных диапазонов
- Определение средних значений скорости
- Расчет карт скоростей с привязкой координат
- Определение скоростных разностей для различных частот

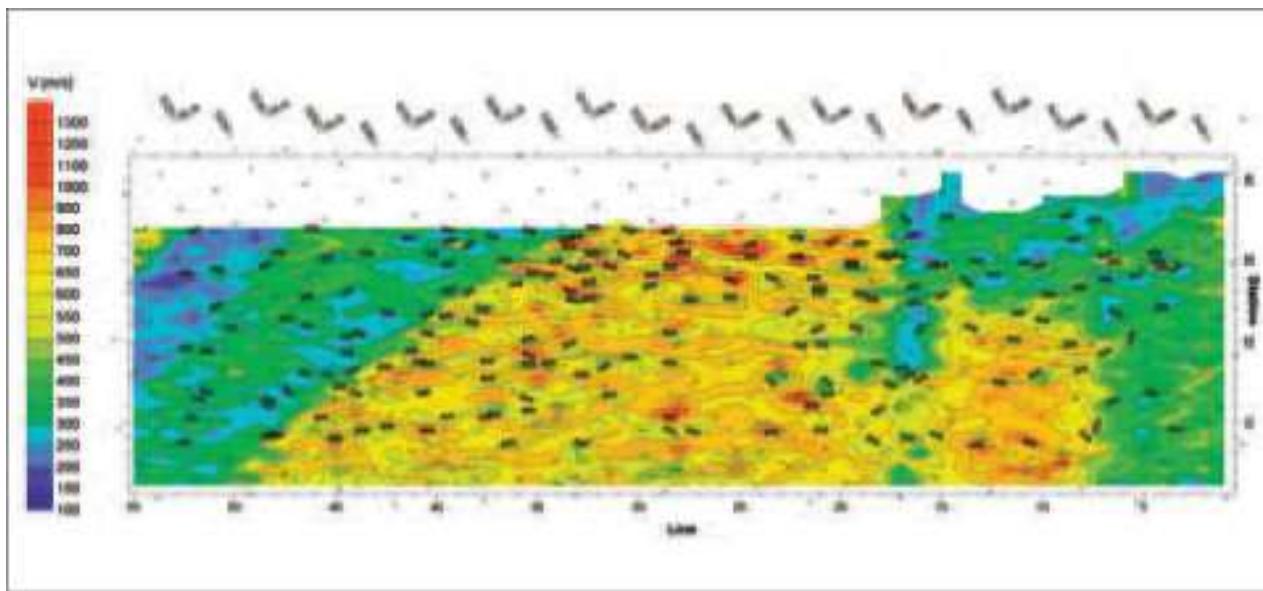
Характеристики распространения фаз поверхностной волны также были исследованы в нескольких частотных диапазонах. Были определены и отмечены места отражения поверхностных волн и места сильного поглощения. В зависимости от спада относительной амплитуды или амплитуд отражения эти места были подразделены в категории 1, 2 и 3 (слабый, средний, сильный). Например, неоднородность категории 2 на 23 канале рис. 3 очень наглядна. Используя значения 1, 2 и 3, неоднородности были нанесены на карту исследуемой области.

### Результаты анализа поверхностных волн

На рис. 4 приведен пример карты фазовой скорости поверхностных волн Релея после полосовой фильтрации с центральной частотой 75 Гц. Значения скорости отображаются с использованием цветовой шкалы в зависимости от профиля и номера сейсмоприемника на данной позиции. Также показаны точные координаты. Эта карта скоростей является прогнозирующей моделью верхних 3 м среды. Также были рассчитаны дополнительные карты с использованием центральных частот 55 Гц и 35 Гц, которые дали информацию о первых 6 и 9 м среды (рис. 8 и 9). Глубины были оценены с помощью половины длины волны для центральной частоты, которая изменяется в пределах исследуемой области, из условия, что можно дать только оценку.



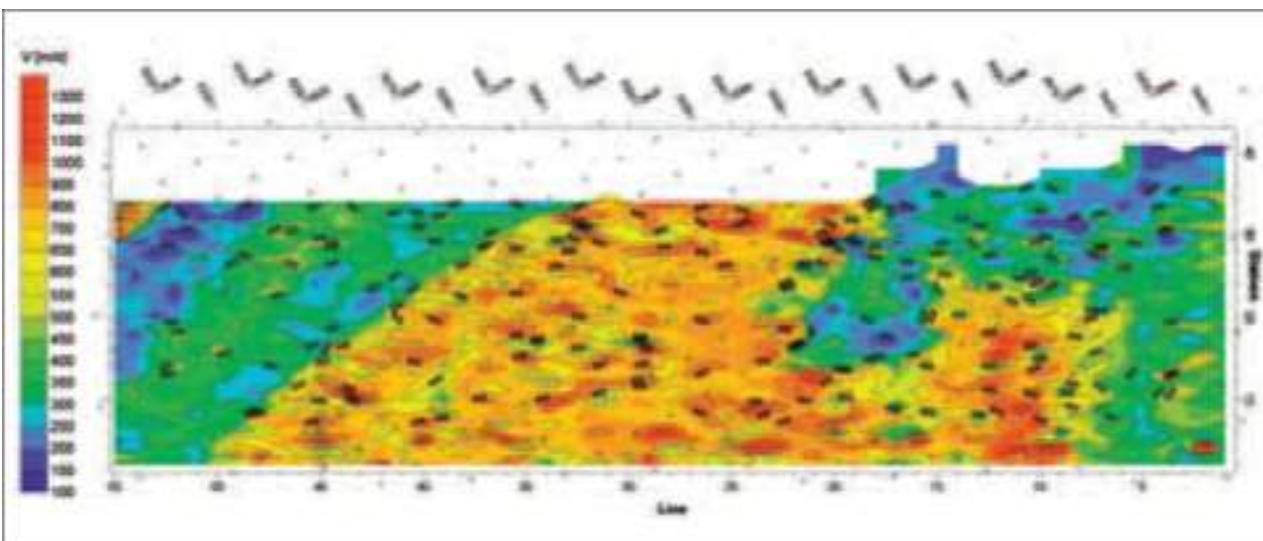
**Рис. 7.** Фотография синего участка с рис. 6 после проверки результатов. Можно заметить, что эта область использовалась для свалки не шлака, а строительного щебня.



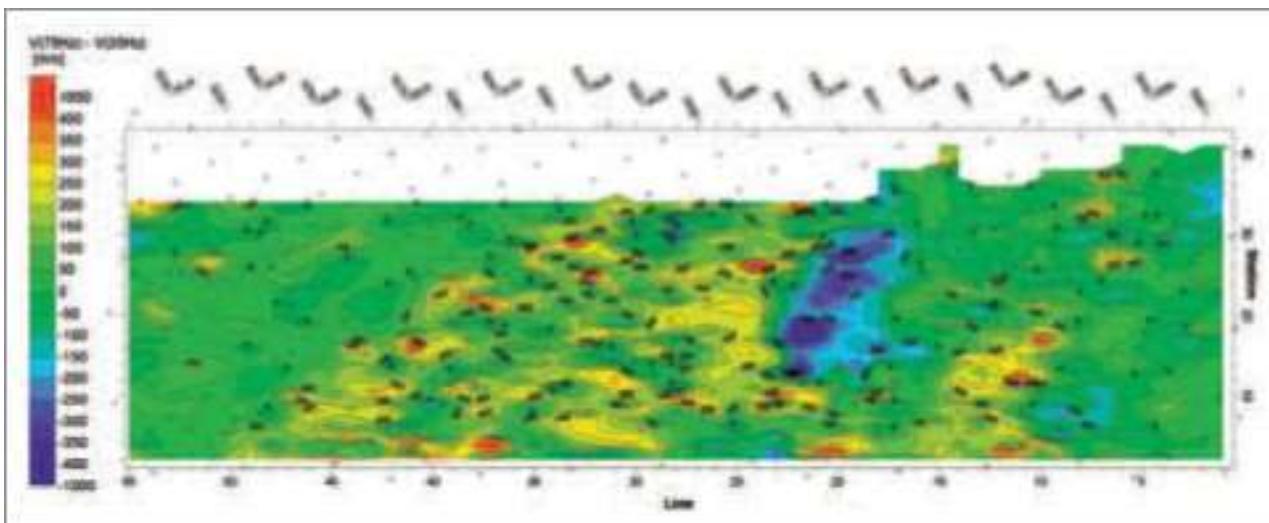
**Рис. 8.** Карта фазовой скорости поверхностных волн Релея в исследуемой области для центральной частоты 35 Гц. Высокие значения скорости в шлаке легко различимы от более низких, соответствующих другим образованиям.

Можно заметить, что в средней части исследуемой области фазовые скорости поверхностных волн относительно высоки (более 300 м/с) по сравнению с теми, которые наблюдаются в естественных условиях, и центральная часть области характеризуется значениями скорости более 500 м/с (красные и желтые участки). Также центральная часть исследуемой области относительно однородна, здесь наблюдается только несколькими скоростными аномалий. Однако одна область в пределах центральной части (профили 16-23; приемники 13-24), характеризуется очень низкими значениями скорости по сравнению с окружающей областью. На границах данной области можно выделить большое количество сильных отражений поверхностной волны (рис. 5). Кроме того, карта разности скоростей (рис. 6, синий участок) дает дополнительное подтверждение наличия неоднородностей в данной области.

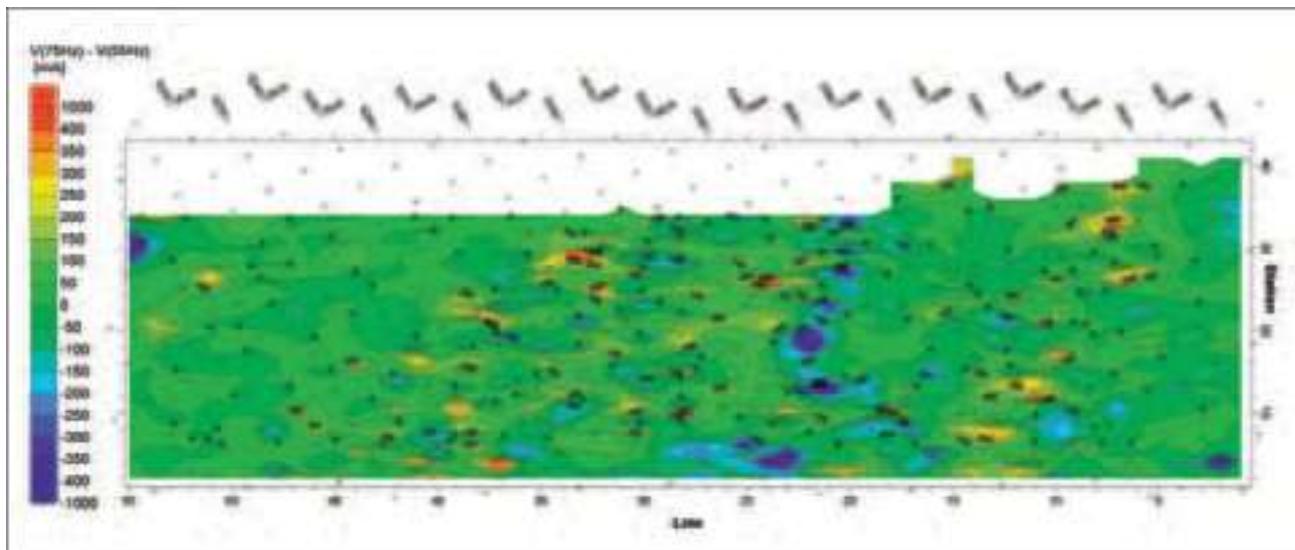
На этой карте зеленые участки соответствуют областям, где дисперсия почти отсутствует для частот от 35 до 55 Гц. Красные или желтые участки соответствуют областям с обратной дисперсией, а синие участки соответствуют областям с нормальной дисперсией. Таким образом, красные и желтые участки рис. 4 соответствуют красным и желтым участкам рис. 6, который описывает характеристики обратной дисперсии, которые ожидаются в случае «шлаковой среды». Шлак окружен «нормальным материалом» и поэтому синий участок рис. 6 «должен» соответствовать другому материалу, а не доменному шлаку. Карта отражений поверхностной волны (рис. 5) отображает те участки, где шлак отделен от других материалов, т. е. границы свалки. Дальнейшая информация о различных интервалах глубин может быть найдена на картах разностей фазовой скорости для 75 Гц и 35 Гц, и для 75 Гц и 55 Гц (рис. 10 и 11).



**Рис. 9.** Карта фазовой скорости поверхностных волн Релея в исследуемой области для центральной частоты 75 Гц. Высокие значения скорости в шлаке легко различимы от более низких, соответствующих другим образованиям.



**Рис. 10.** Карта разностей фазовой скорости поверхностных волн Релея в исследуемой области для частотного диапазона от 35 до 75 Гц. Синие участки соответствуют областям с нормальной дисперсией, а желтые и красные участки — областям с обратной дисперсией. Зеленые участки соответствуют областям с отсутствием дисперсии для частот от 35 до 75 Гц.



**Рис. 11.** Карта разностей фазовой скорости поверхностных волн Релея в исследуемой области для частотного диапазона от 55 до 75 Гц. Синие участки соответствуют областям с нормальной дисперсией, а желтые и красные участки — областям с обратной дисперсией. Зеленые участки соответствуют областям с отсутствием дисперсии для частот от 55 до 75 Гц.

Синий участок рис. 6, который был признан самой важной аномалией в пределах исследуемой области, был вскрыт экскаватором, чтобы понять материальные условия данного антропогенного участка. На рис. 7 приведена фотография данной области после проверки результатов. Можно заметить, что эта область использовалась для свалки не шлака, а старого строительного щебня. Отражения поверхностных волн (рис. 5) в пределах данной области обоснованы сменой типа данного строительного щебня.

Некоторые другие небольшие неоднородности в пределах шлака (отражения, локальные зоны низкой скорости и области нормальной дисперсии) могут быть обнаружены с использованием карт с рис. 4, 5 и 6. Некоторые из них соответствуют полостям, рыхлым материалам или обводненным пустотам.

### Заключение

Свалка доменного шлака была исследована с использованием поверхностных волн Релея. Цель исследований заключалась в обнаружении областей, включающих рыхлый материал или пустоты. Вследствие того, что волны Релея характеризуются дисперсией и различные частотные части фаз дают информацию о различных глубинах, можно было рассчитать карты различных частот фазовых скоростей и, следовательно, различных глубин. Также была рассчитана карта отражений поверхностных волн Релея, которая сравнивалась с результатами карт скорости. Комплекс всех результатов дал хорошую оценку подземных условий исследуемой области. Исследуемая область была разделена на две части. В центральной области была расположена основная часть доменного шлака, тогда как в остальной части среди были отложены другие материалы.

Была выявлена большая область свалки старого строительного щебня и области с локальными аномалиями, соответствующими пустотам и рыхлому материалу в пределах шлака.

Хотя ожидалось, что область доменного шлака окажется очень сложной для исследования с помощью поверхностных волн из-за характера обратной дисперсии волн Релея, относительно простой метод расчета карт скорости и карт отражений удовлетворил запросы клиента. Уплотнение области свалки шлака с использованием разгоняемых падающих грузов применялось только в областях, где были выявлены пустоты или наличие рыхлого материала, следовательно, шумовое воздействие на окружающую среду было сведено к минимуму.

### **Ссылки на литературу**

- Dresen, L. and Ritter, H. [1994] Seismic Coal Exploration Part B: In-Seam Seismics. In Helbig, K. and Treitel, S. (Eds) *Handbook of Geophysical Exploration Section I. Seismic Exploration*, vol. 16B. Pergamon Press, Oxford. Haskell, N.A. [1953] The dispersion of surface waves in multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17-43.  
 Keilis-Borok, V.I. [1989] Seismic Surface Waves. In *Laterally Inhomogeneous Earth, Modern Approaches in Geophysics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Nakanishi, I. [1993] Surface Wave Tomography: Velocity and Q. 5, 92-132. In: Iyer, H.M. and Hirahara, K. (Eds) *Seismic Tomography*. Chapman & Hall. Oxford. Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. [1999] Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64, 800-8008. Seidl, D. and Mitterer, S. [1977] Seismische Oberflächenwellen. *Journal of Geophysics*, 42, 283-328.