

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ИСКУССТВЕННЫХ УДЕРЖИВАЮЩИХ И ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ МЕТОДАМИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Ю.С.Исаев, К.А. Дорохин

ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» г. Санкт-Петербург

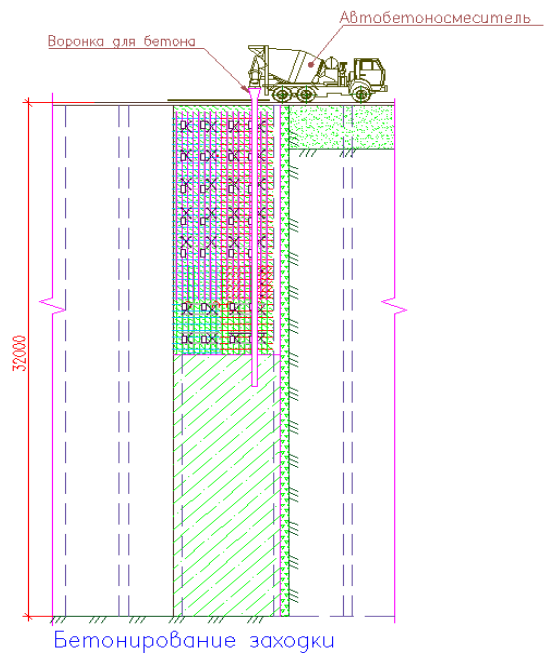
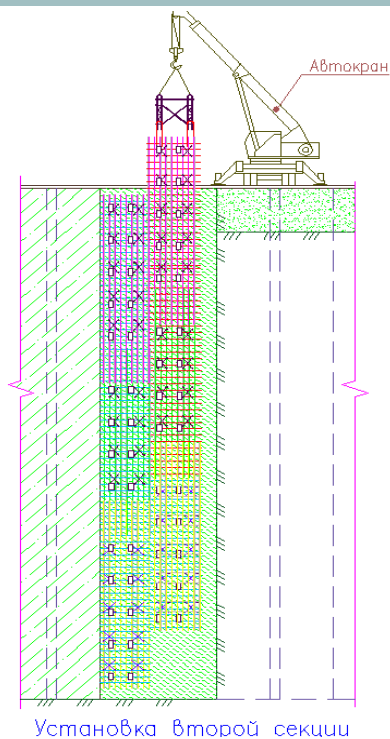
В настоящее время большой необходимостью развития мегаполисов является освоение подземного пространства:

- строительство транспортных коммуникаций;
- строительство подземных паркингов;
- строительство торговых зон и т.д.

При реализации таких проектов существенно возрастает риск возникновения аварий и повреждения существующей застройки в области влияния строительных работ.

Возможность снижения риска возникновения аварий при строительстве подземных сооружений в городской черте появляется только при условии выявления неблагоприятных факторов, оказывающих негативное влияние на существующую застройку или возводимый объект, и разработке мероприятий, минимизирующих негативное влияние.

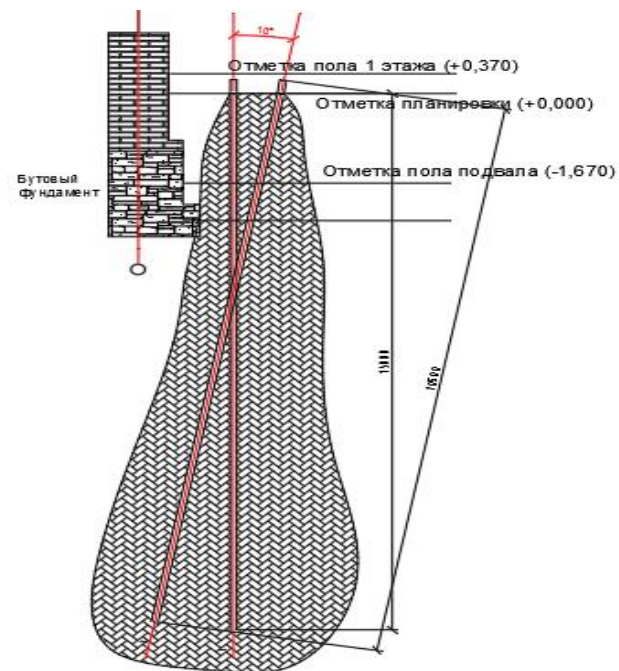
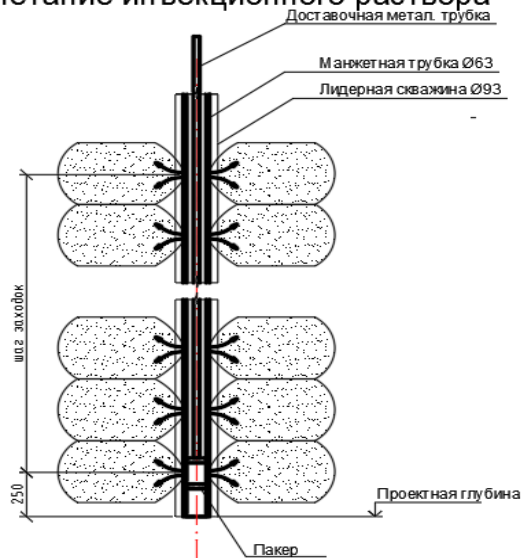
К таким мероприятиям можно отнести возведение различных видов ограждающих и противодиффузионных подземных конструкций типа «стена в грунте», работы по инъекционному закреплению (улучшению природных свойств) вмещающего массива.



Устройство «Стены в грунте»

Закрепление грунтов под основанием существующих зданий, при проведении строительных работ в непосредственной близости.

Нагнетание инъекционного раствора



В области влияния строительства в грунтовом массиве могут происходить процессы: уплотнения; разуплотнения; упрочнения; разупрочнения; деформации формоизменения – вплоть до потери несущей способности основания (выпора из-под подошвы фундамента, обрушению подпорной стенки и т.д.).

Перечисленные выше мероприятия при большом количестве достоинств имеют один существенный недостаток:

✓ **невозможность прогнозирования характеристик, сплошности, объемов, прочности и водонепроницаемости возводимых подземных сооружений и массивов, искусственно закрепленных грунтов.**

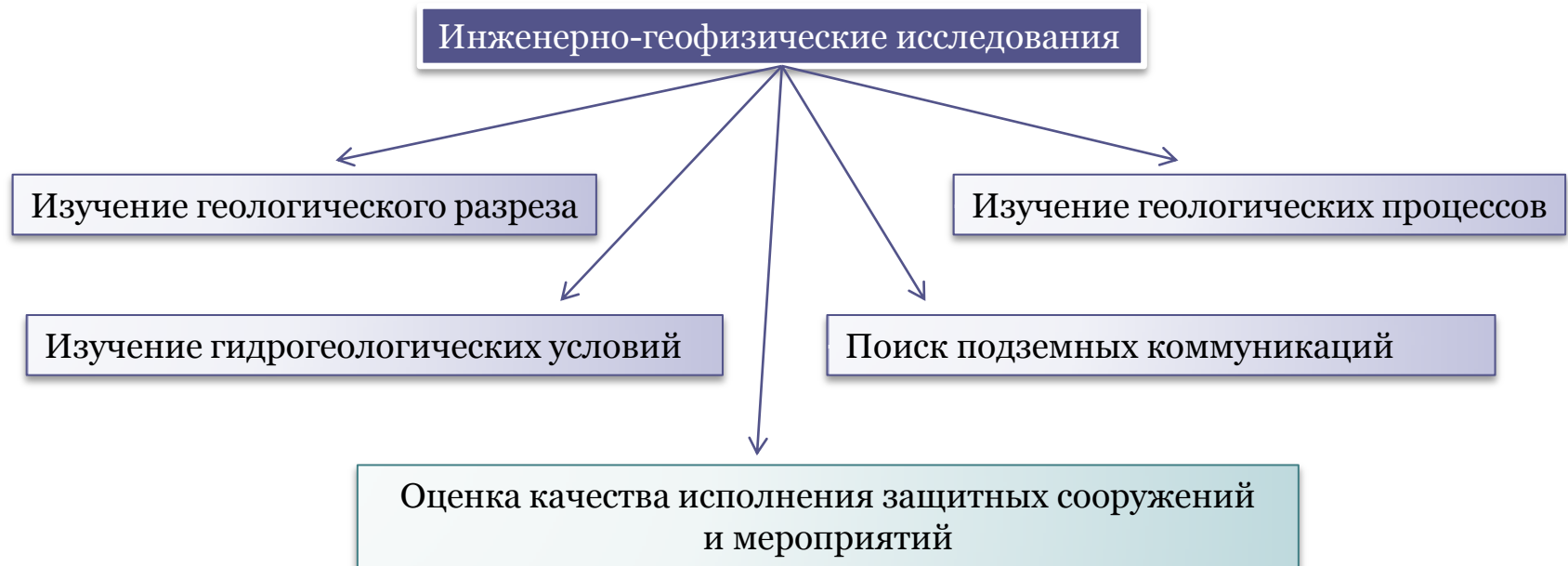


В практике имеется много примеров, когда после вскрытия возведенных искусственных удерживающих и противодиффузионных сооружений и искусственно закрепленных грунтовых массивов обнаруживалось несоответствие их основных характеристик проектным.

Прежде всего это повышает риск возникновения различных аварий, как при строительстве, так и проблемами в процессе последующей эксплуатации.

Часто ущерб в результате аварии во много раз превышает затраты на выполнение инженерно-геофизических исследований, а время на ликвидацию последствий аварии может существенно изменить график строительства.

Важно производить контроль качества возведения искусственных удерживающих и противофильтрационных подземных сооружений и мероприятий.



Новый объект для геофизических исследований - оценка качества выполнения защитных мероприятий, проверка соответствия выполняемых работ проекту и требованиям строительных норм и правил в виде контрольных наблюдений, которые в большей степени осуществляются с помощью *сейсмоакустических методов*.

Преимущество применения сейсмоакустических
методов:

- ✓ неразрушающий контроль;
- ✓ эффективность и мобильность;
- ✓ скорость выполнения;
- ✓ наличие высоких корреляционных связей

между скоростью распространения продольных
волн и физико-механическими свойствами
материала исследуемой среды.

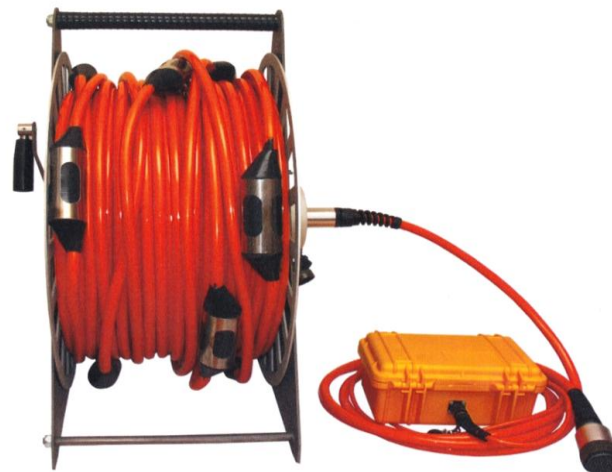
Аппаратура применяемая исследованиях



Генератор импульсов и скважинный источник



Обсадная колонна ПВХ

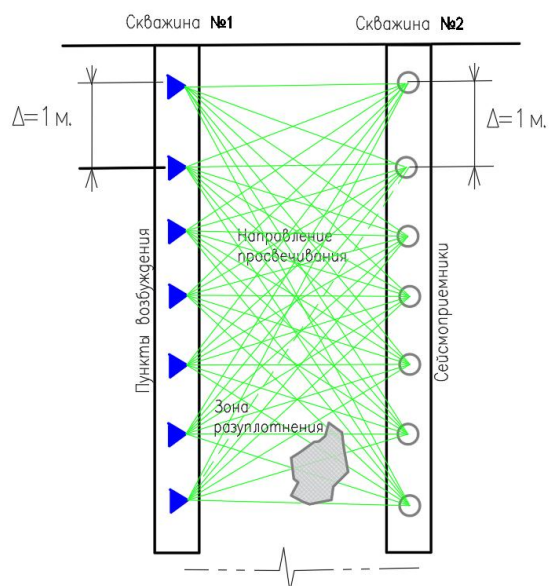


Гидрофонная коса (12 каналов) Шаг между гидрофонами 1 м.

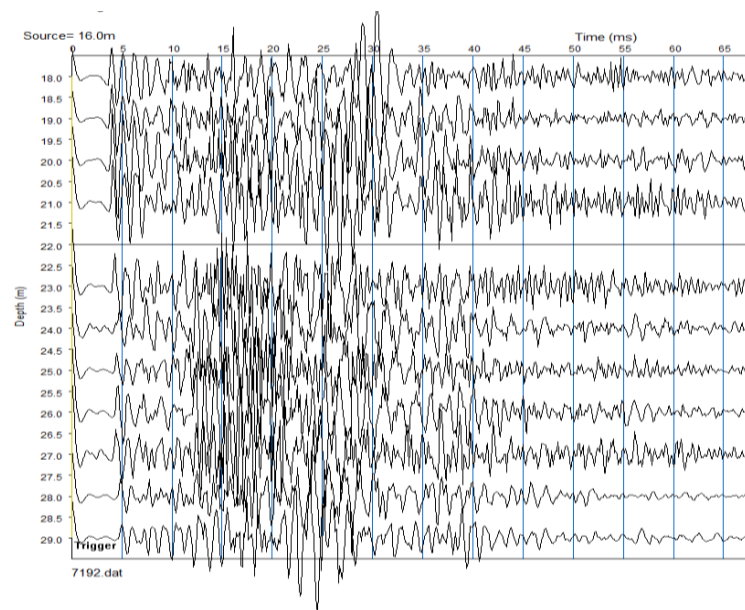


Сейсмостанция (многоканальная)

Суть метода межскважинного сейсмоакустического просвечивания (МСП) заключается в возбуждении упругой волны в одной скважине, регистрации в другой и дальнейшем анализе ее характеристик. В отличие от наземных методов сейсморазведки, МСП обладает рядом преимуществ, основным из которых – приближение источников и приемников к объекту исследования, и отсутствие необходимости регистрации волн через неоднородный поглощающий поверхностный слой.



Принципиальная схема производства МСП



Сейсмограммы для каждого дискретного положения источника

Обработка данных осуществляется в виде сейсмоакустической томографии, что существенно повышает детальность и разрешающую способность исследований сложно построенных, малоконтрастных сред.

Разрешающая способность зависит от множества факторов:

- Система наблюдений;
- Качество данных;
- Уровень шума;
- Строение среды (распределение скорости в среде);
- Частотный состав зондирующего импульса;
- Правильности априорных представлений о строении среды (адекватности начальной модели) ;

Физический предел разрешающей способности метода лучевой сейсмотомографии соизмерим с размером первой **зоны Френеля h**:

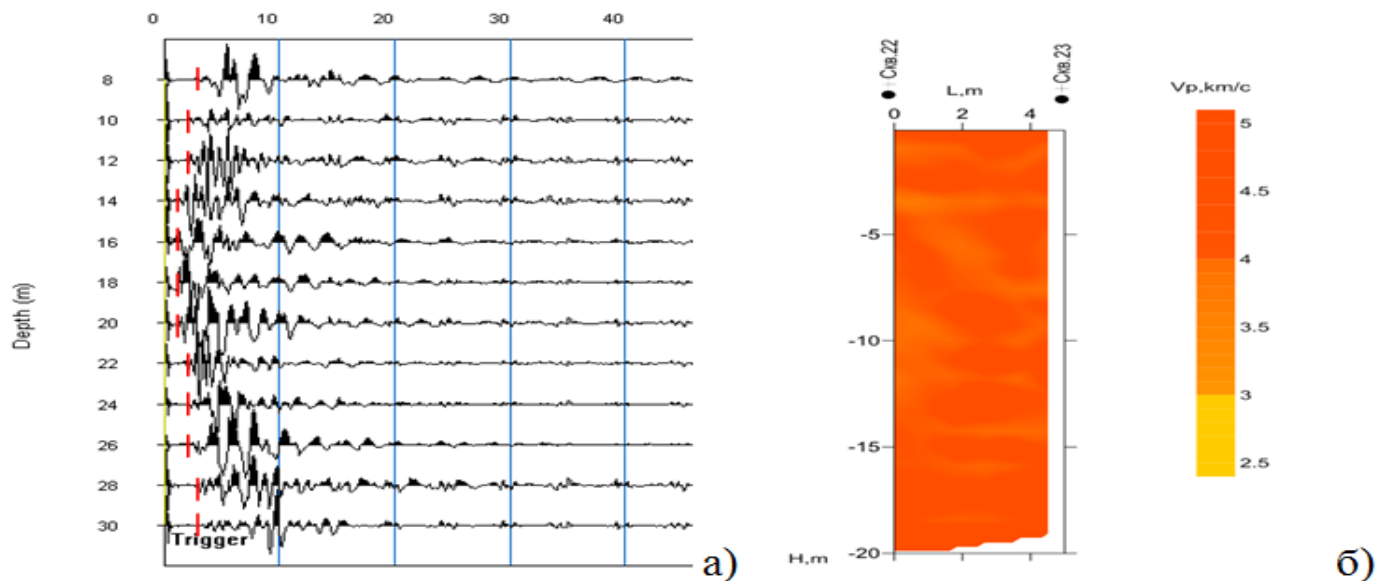
$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda \cdot l} \quad , \text{ где } \lambda - \text{длина волны; } l - \text{длина луча.}$$

Обнаружение локальных аномалий скорости (одиночных неоднородностей) эффективно при условии, что их размер больше или соизмерим с диаметром зоны Френеля, а также при изучении субгоризонтальных структур слоистого разреза. Изучение структуры аномалий скорости (**на качественном уровне**) и при размере неоднородностей меньше зоны Френеля, но только в случае идеального лучевого и углового покрытия, т.е. наличия плотной системы лучей.

Технологический процесс обработки и интерпретации материалов скважинных исследований состоит из двух основных этапов:

- предварительной обработки (рис.А);
- томографической обработки (рис.Б).

При этом основой для обработки являются сейсмограммы сейсмических записей, полученные от каждого дискретного положения источника возбуждения при межскважинном просвечивании.

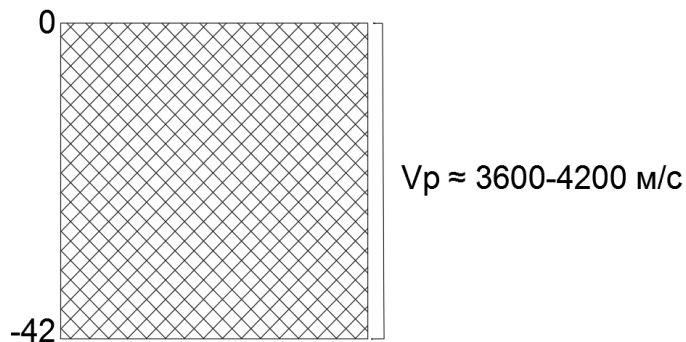


В конечном итоге обработка материалов скважинной сейсморазведки сводится к получению кинематических разрезов (рис.2б), характеризующих особенности структуры изучаемой среды. При этом области, в которых качество проверяемых работ по каким-либо причинам не соответствует проектному, хорошо выделяются на кинематических разрезах.

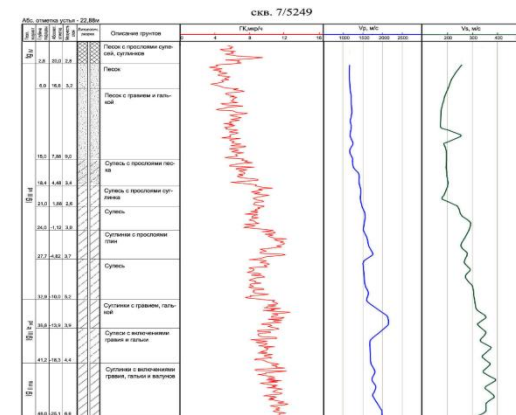
Надежность получаемого при сейсмотомографии решения во многом зависит от корректности модели первого приближения. На практике очень часто в качестве первого приближения выбирается результат решения обратной томографической задачи для случая однородной среды, рассчитанной по средней для данного разреза скорости упругих волн.

При изучении межскважинного пространства практически всегда существует некоторая априорная информация.

Это могут быть данные акустического каротажа, ВСП, некоторое известное строение той или иной части исследуемого объекта.



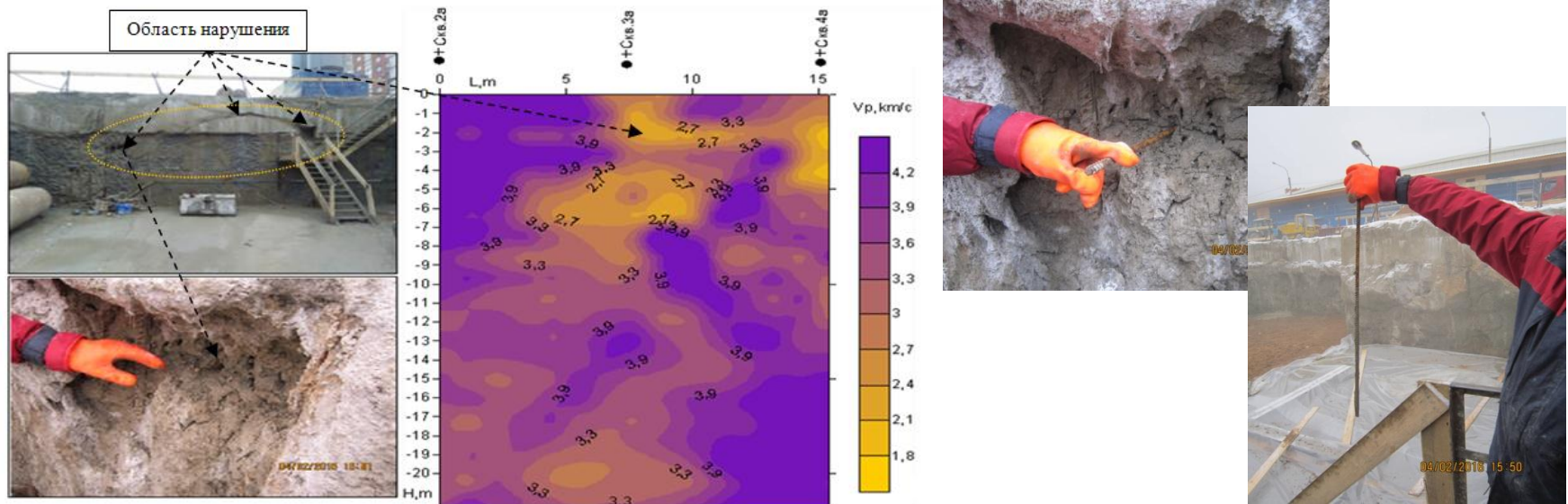
Для случая «стены в грунте»



Для случая исследования грунтового массива

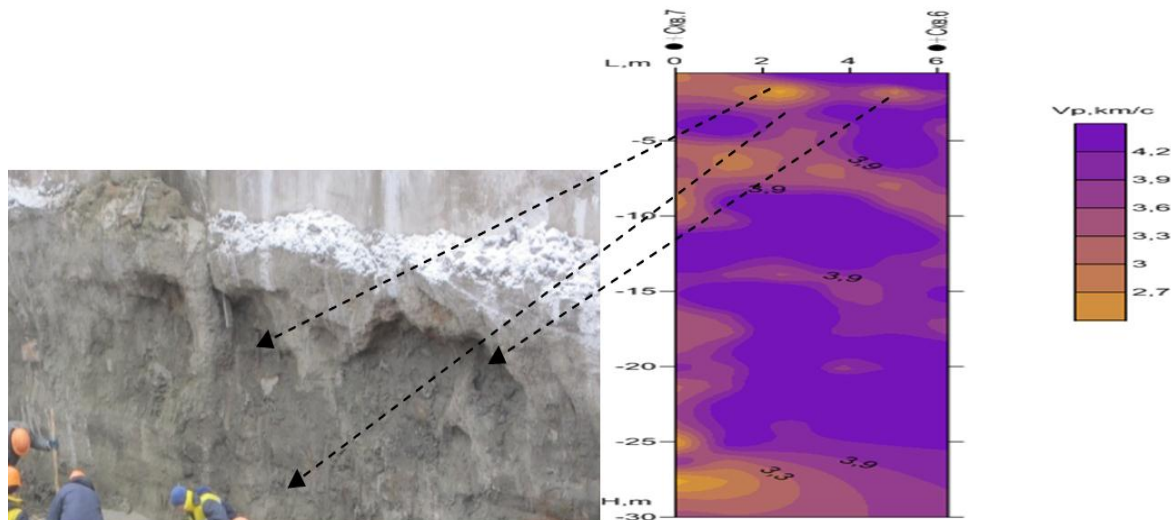
Включение априорной информации, вызывающей доверие, а также скоростной модели среды (например, по данным ВСП), значительно улучшает качество решения и обратной томографической задачи.

Пример результатов межскважинного сейсмоакустического просвечивания, проведенных для оценки качества исполнения стены в грунте. Глубина заложения стены в грунте достигала 42-х метров. МСП осуществлялись между скважинами, заложеными в конструкцию стены в момент ее изготовления.

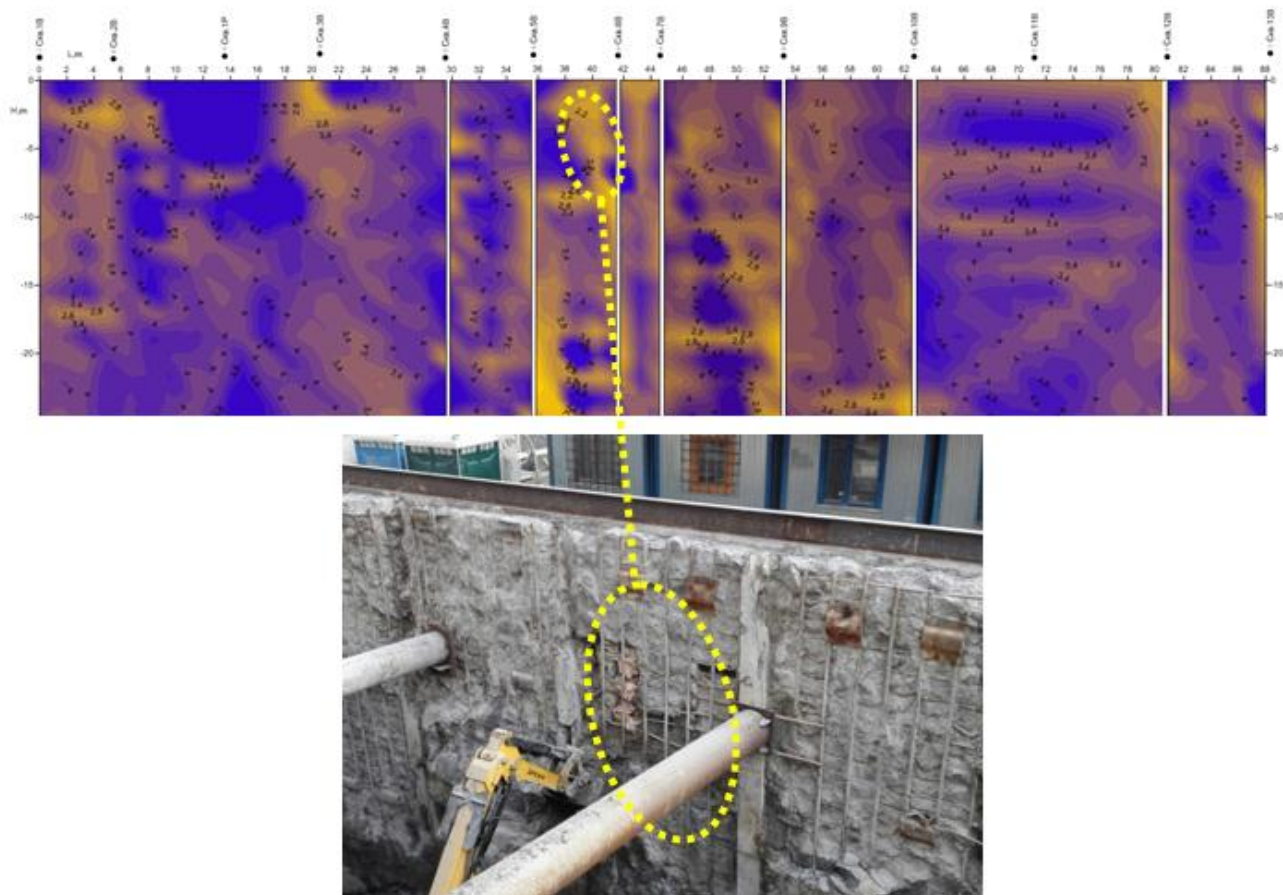


Исследования проводились после возведения стены в грунте и набора бетонной смеси не менее 70 % прочности. После завершения обследований начались работы по выемке грунта из котлована.

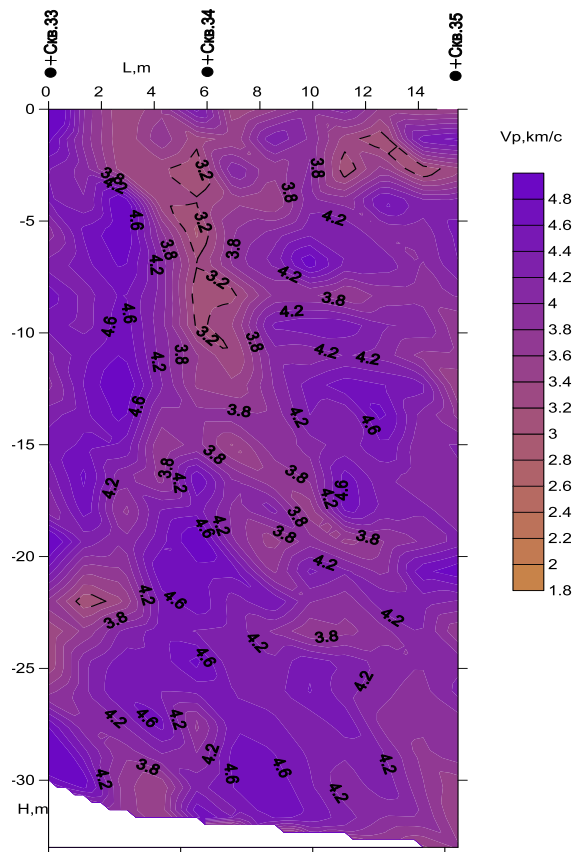
При вскрытии стены от грунта многие аномальные области, отмеченные на кинематических разрезах подтвердились локальными линзовидными грунтовыми включениями или областями, с недостаточной прочностью бетона, предположительно, возникшими из-за некачественной бетонной смеси, используемой строителями, либо в результате суффозионного выноса цемента еще до становления бетона в обводненных слоях грунтового массива.



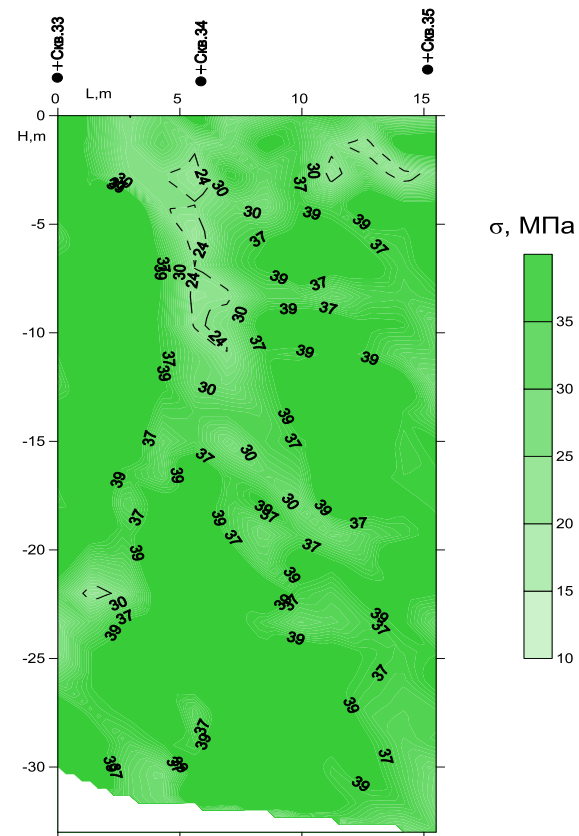
В процессе эксплуатации объекта в некоторых выделенных областях были отмечены водопоступления, через «стену в грунте» в местах, которые характеризовались низкими скоростными характеристиками.



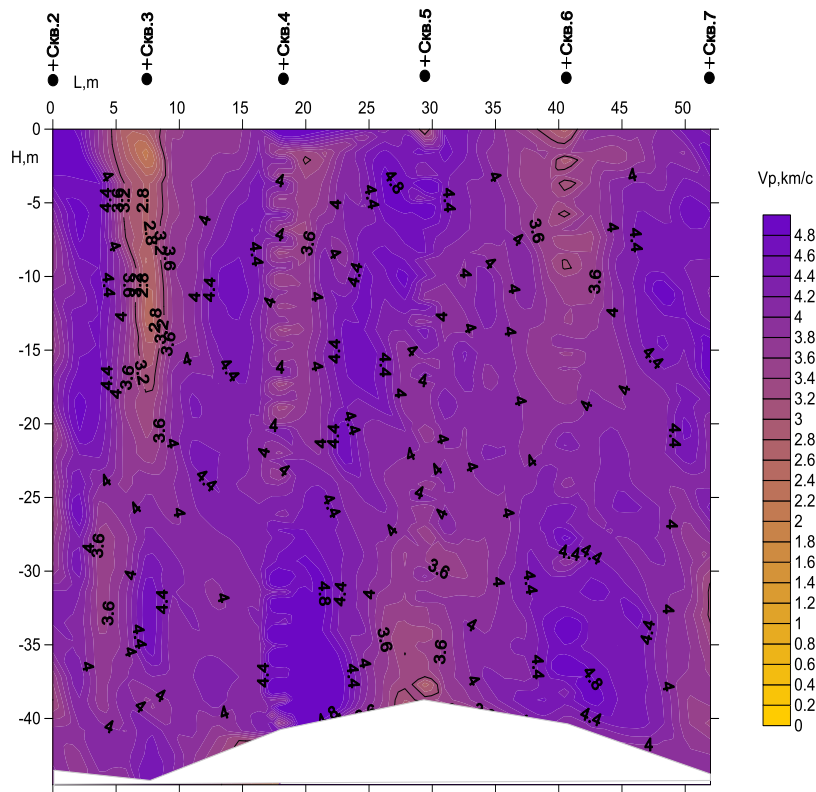
Оценка качества стены направлена в первую очередь на выявление существенных недостатков в ее конструкции, которые могут повлиять на ее устойчивость в целом, в период выемки грунта из котлована, когда напряженное состояние на стену особенно существенно и в процессе разработки участвует большое количество строителей и их безопасность имеет важное значение.



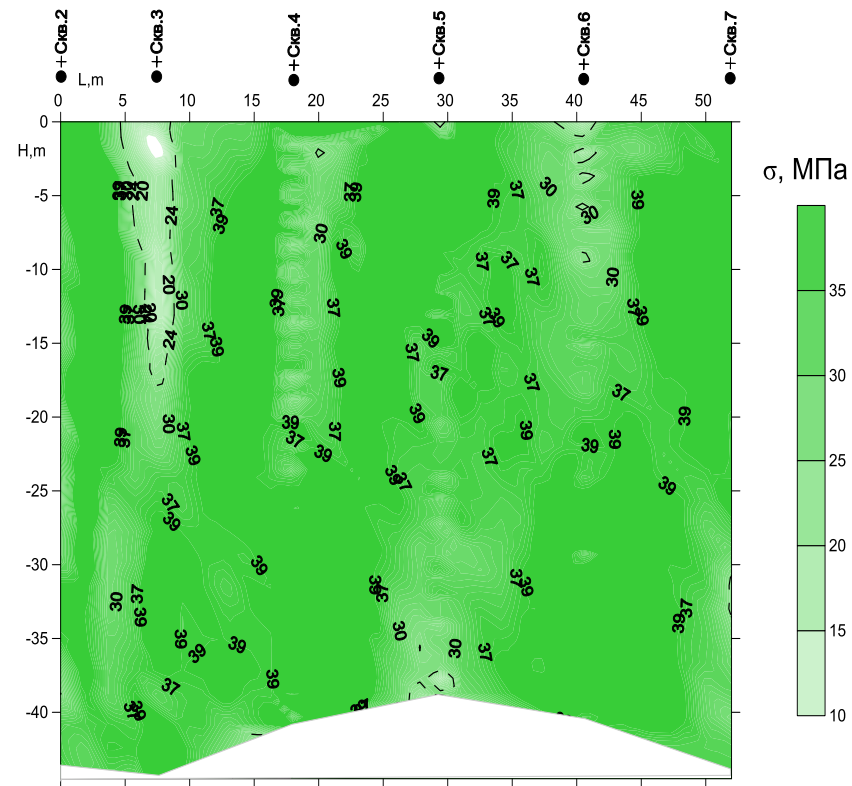
Сейсмотомографический разрез стены в грунте по скоростям продольной волны (V_p) между скважинами 33, 34 и 35



Разрезы стены в грунте между скважинами 33, 34 и 35 по пределу прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$)



Сейсмотомографический разрез стены в грунте по скоростям продольной волны (V_p) между скважинами 2-3-4-5-6-7



Разрезы стены в грунте между скважинами 2-3-4-5-6-7 по пределу прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$)

Оценка прочности бетона в конструкции «стена в грунте»

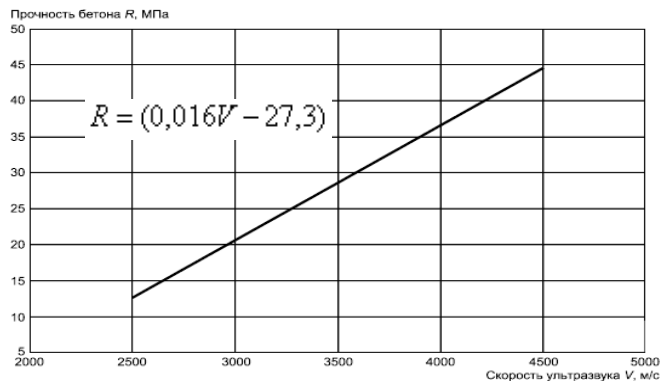
Прочность на сжатие является основным показателем качества бетона. По этому показателю устанавливается класс бетона. В СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» (дата актуализации 21.05 2015 г.) класс бетона обозначается латинской буквой «В» с цифрами, которые указывают прочность бетона на сжатие в МПа. (Например, обозначение В25 означает, что бетон этого класса в 95% случаев выдерживает нагрузку в 25 МПа).



На основании установленных уравнений корреляционной связи между скоростью продольной волны и величиной предела прочности на сжатие, оценивается прочность бетона с помощью ультразвуковых методов.

Скорость продольной волны в пределах действия малых идеально упругих деформаций является инвариантной (не зависящей от частоты) характеристикой исследуемых материалов, что позволяет проводить интерпретацию результатов полевых сейсмоакустических измерений скорости V_p (частоты от единиц герц до 2-5 кГц) по данным ультразвуковых (частоты десятки и сотни кГц) лабораторных ее определений по образцам.

В данном случае корреляционные уравнения связи скорости ультразвука с прочностью можно использовать для оценок прочности бетона в конструкции «стена в грунте» по скоростям сейсмических волн установленных по данным МСП.

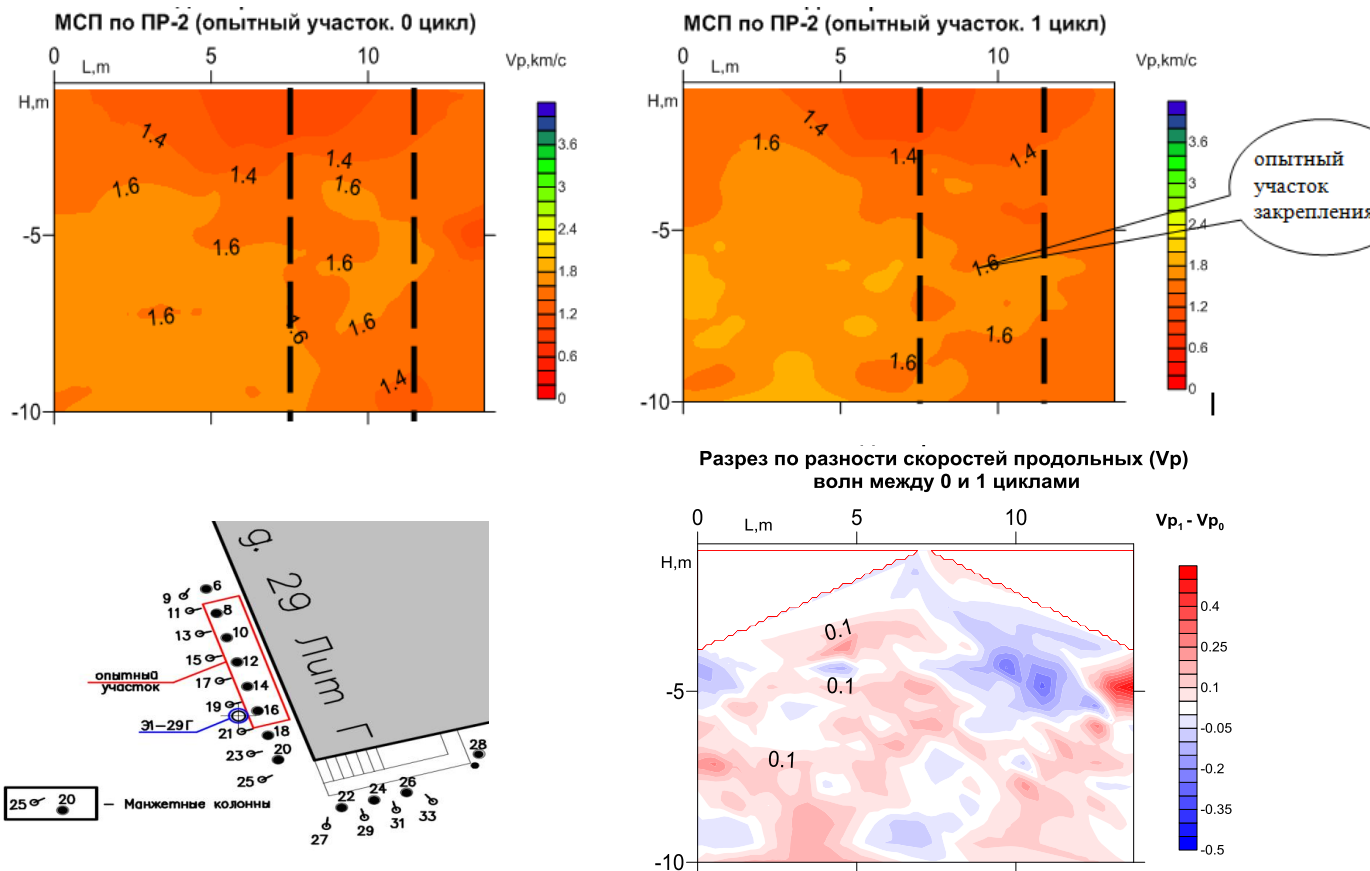


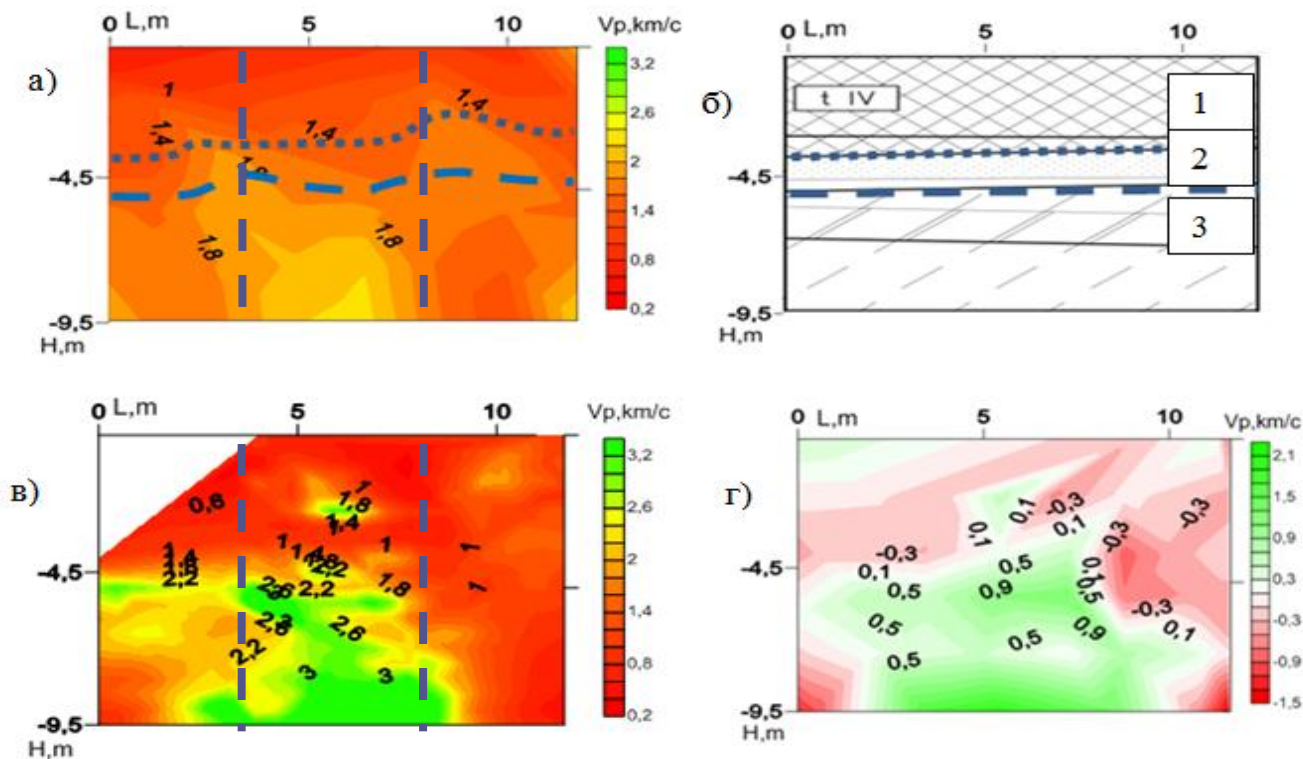
Для бетонов проектных классов В7.5-В35

В актуализированном 01.01.2014 г. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности в Приложении Г приводится универсальная градуировочная зависимость, которую можно использовать для ориентировочной оценки прочности бетона в конструкции «стены в грунте».

Пример работ по контролю качества инъекционного закрепления грунтов

Для оценки качества необходимо сначала произвести нулевой цикл исследований МСП, что позволит оценить характеристики грунтов до их взаимодействия с инъекционным раствором. После выполнения инъекционных мероприятий выполняются контрольные исследования МСП, по результатам которых оценивается эффективность мероприятий.





Результат межскважинного сейсмоакустического просвечивания, полученный до закрепления грунтового массива (рис. а). Полученный разрез хорошо коррелируется с данными инженерно-геологических изысканий (рис. б). В верхней части разреза залегают насыпные техногенные слабодислоцированные грунты (1), под ними слой водонасыщенных песков (2), которые подстилают слой суглинков (3).

На рисунке в представлен результат межскважинного сейсмоакустического просвечивания, полученный через 22 дня после закрепления. На рисунке г представлен разностный скоростной разрез, который характеризует изменения скоростных характеристик грунтов, которые удалось зафиксировать через 22 дня после проведения нагнетаний.

Для расчета основных физико-механических характеристик также необходимы значения скорости распространения поперечной волны V_s . Для определения скоростей поперечных волн можно воспользоваться несколькими способами:

- Использование скважинного источника поперечных волн (дополнительный комплект аппаратуры);
- Использование дополнительного профилирования на поверхности (при условии, если контроль производится на небольших глубинах);
- Использование скорости гидроволн, возникающих в приемной скважине.

Скорости гидроволн в приповерхностной части разреза чрезвычайно чувствительны к таким свойствам околоскважинных грунтов как сопротивление сдвигу:

$$G_d = \frac{\rho V_p^2}{\frac{V_h^2}{V_p^2} - 1},$$

через модуль сдвига можно рассчитать скорость поперечной волны $V_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}}$, где: V_h – скорость гидроволны, V_p – скорость продольной волны V_s – скорость поперечной волны, G_d – модуль сдвига динамический, ρ – плотность грунтов [22].

Выводы

- Возможность снижения уровня риска при строительстве в городской черте появляется лишь при всестороннем анализе конкретной строительной ситуации с выявлением и минимизацией факторов риска, оказывающих негативное воздействие на объект строительства или существующую застройку.
- Проверка качества исполнения «защитных сооружений и мероприятий», соответствия выполняемых работ проектной документации и требованиям строительных норм и правил является новым объектом для геофизических исследований, которые могут осуществляться, в том числе, с помощью сейсмоакустического межскважинного просвечивания (МСП).
- По данным, полученным с помощью МСП, эффективно выделяются области, которые не соответствуют проекту, производится анализ причин несоответствия и назначаются превентивные мероприятия по устранению негативных факторов.

Спасибо за внимание!