МЕТОДЫ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТОВ CPTU, SCPT И RCPT: ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ, АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

ШОКАЛЬСКИЙ М.Ю.
Ведущий инженер-геолог ООО «Геоинжсервис», группа компаний «Фугро», г. Москва
shm@fugro.ru

Аннотация
В статье кратко рассматривается практика применения методов статического зондирования грунтов с измерением порового давления (CPTU), скоростей волн сдвига (сейсмостатическое зондирование - SCPT) и электрического сопротивления или электропроводности (RCPT). Обсуждаются анализ и обработка получаемых с их помощью результатов. Представлены примеры трехмерной (3D) визуализации получаемых данных

Ключевые слова
Статическое зондирование грунтов с измерением порового давления (CPTU); статическое зондирование с измерением скоростей волн сдвига (сейсмостатическое зондирование) (SCPT); статическое зондирование с измерением электропроводности (RCPT)

Введение

Статическое зондирование (CPT - cone penetration testing) хорошо зарекомендовало себя при инженерно-геологических изысканиях на суше и в акваториях. В мировой практике это самый распространенный вид полевых испытаний грунтов. Он обладает значительной технико-экономической эффективностью, позволяет оперативно получать очень большие объемы информации. Зондирование CPT позволяет анализировать грунтовые условия площадок работ, выделять ИГЭ, характеризовать их свойства и выполнять анализ фундаментов. Выполнение этого вида полевых испытаний грунтов можно смело рекомендовать в качестве первого этапа полевых инженерно-геологических изысканий, по результатам которого можно корректировать последующие работы по инженерно-геологическому опробованию и лабораторному анализу.

Надежность получаемых с помощью CPT данных обеспечивается контролем качества, выполняемым непосредственно при производстве работ и в процессе обработки данных. При этом конечные фактические результаты зондирования (сопротивление под острием конуса и по муфте трения и др.) практически лишены влияния человеческого фактора, которое растет в процессе последующего анализа данных и их интерпретации.

Статическое зондирование выполняется в массиве грунта, и это позволяет более точно характеризовать грунт и избегать многочисленных влияющих на получаемые результаты факторов, которые свойственны инженерно-геологическому бурению/опробованию и лабораторным работам. Получить качественные результаты зондирования практически на порядок проще, чем качественные результаты комбинированного процесса «бурение - пробоотбор - описание - упаковка - транспортировка - хранение образцов - лабораторные работы».

Бурное развитие микроэлектроники и накопленный опыт проведения работ позволили значительно усовершенствовать измерительное оборудование за последние десятилетия. Использование специально спроектированных установок для выполнения статического зондирования (рис. 1) позволяет наиболее полно раскрыть потенциал метода и расширить его применение.

В свою очередь, развитие программных комплексов выводит на новый уровень методы анализа полученных данных.

Рис. 1. Установка CPT

Тестирование грунтов на большой глубине из области мечтаний инженеров-геологов уверенно перемещается в область ежедневной практики. Например, при выполнении испытаний без применения предварительного разбуривания были достигнуты следующие проектные глубины: 53 м (Казань); 45 м (Тобольск); 46 м (Сочи); 56 м (Москва); 45 м (Когалым).

Совершенствуются и усложняются конструкции пенетрометров, добавляются дополнительные датчики и модули, что позволяет регистрировать дополнительные параметры грунта, расширяя возможности метода и увеличивая его экономическую эффективность. Для простоты будем называть добавление в конструкцию пенетрометра дополнительных датчиков и модулей модификацией, хотя, по сути, это дает возможность комбинирования различных уже существующих методов получения данных в процессе одного тестирования и выполнения самого статического зондирования с «доставкой» исследовательского оборудования в массив грунта.

В практике изысканий используются следующие модификации статического зондирования:

1) с измерением порового давления (CPTU);
2) с измерением электропроводности (RCPT);
3) с измерением скоростей волн сдвига (сейсмостатическое зондирование) (SCPT);
4) с проведением прессиометрии (CPM);
5) с проведением магнитометрии (для обнаружения наличия металлических предметов);
6) с установлением наличия углеводородных загрязнителей, их типа и концентрации (CPT/ROST);
7) с установлением наличия летучих хлорорганических соединений и других летучих органических компонентов (CPT/MIP);
8) с детекцией тяжелых металлов;
9) с записью звуков при внедрении конуса (Acoustic CPT);
10) с проведением гамма-каротажа;
11) с измерением температуры грунта (TCPT).

В практике российских работ, как правило, используются модификации № 1-3, единичные объекты тестируются с привлечением оборудования для № 4 и 6 из вышеперечисленных.

Описанию каждой модификации, возможностей ее применения и анализа получаемых данных можно посвятить не одну статью. В настоящей публикации дается краткое практическое описание модификаций № 1-3, по которым накоплен значительный опыт применения на территории России.

Выполнение статического зондирования с измерением порового давления (CPTU)

При зондировании CPTU наличие датчика порового давления позволяет измерять давление при проведении статического зондирования. Этот датчик также делает возможным проведение дополнительных тестов по стабилизации и рассеиванию порового давления. Дополнительные тесты проводятся при прерывании вдавливания оборудования и в зависимости от поставленных задач могут длиться от нескольких минут до нескольких дней.

Важно понимать, что регистрируемое при внедрении конуса и имеющееся в массиве грунта поровое давление - это в большинстве случаев разные показатели. Для оценки порового давления в массиве грунта используются тесты по стабилизации и рассеиванию давления (рис. 2, 3).

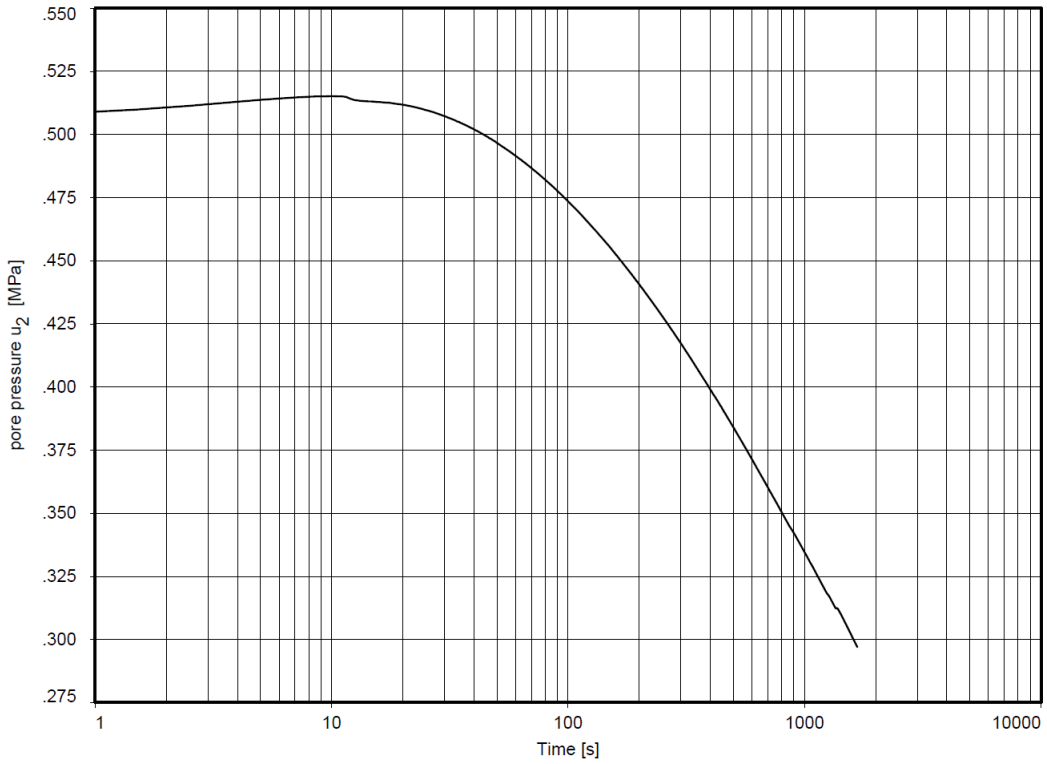

Рис. 2. Результаты теста по рассеивания порового давления (PPDT)

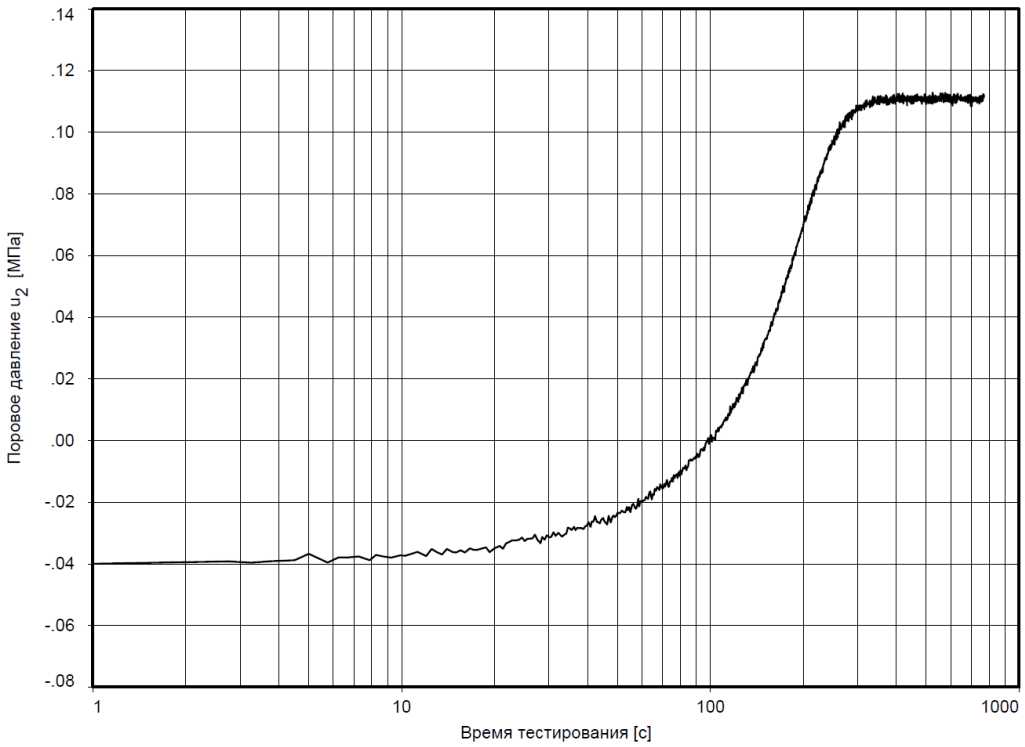

Рис. 3. Результаты теста по стабилизации порового давления (PPST)

Тест по рассеиванию порового давления проводят в глинистых грунтах для оценки коэффициентов фильтрации и консолидации и иногда порового давления в массиве грунта. Среднее время проведения теста составляет 20-30 минут.

Тест по стабилизации порового давления проводят в песчаных грунтах для оценки гидростатического давления (порового давления в массиве грунта). Результаты тестирований совместно с данными гидрогеологических наблюдений при бурении используются для анализа уровней грунтовых вод. Пример такого анализа представлен на рис. 4, 5. Выполнение тестов в данном примере позволило выделить несколько уровней подземных вод и рекомендовать глубины установки наблюдательных скважин для проведения опытных работ и режимных наблюдений.

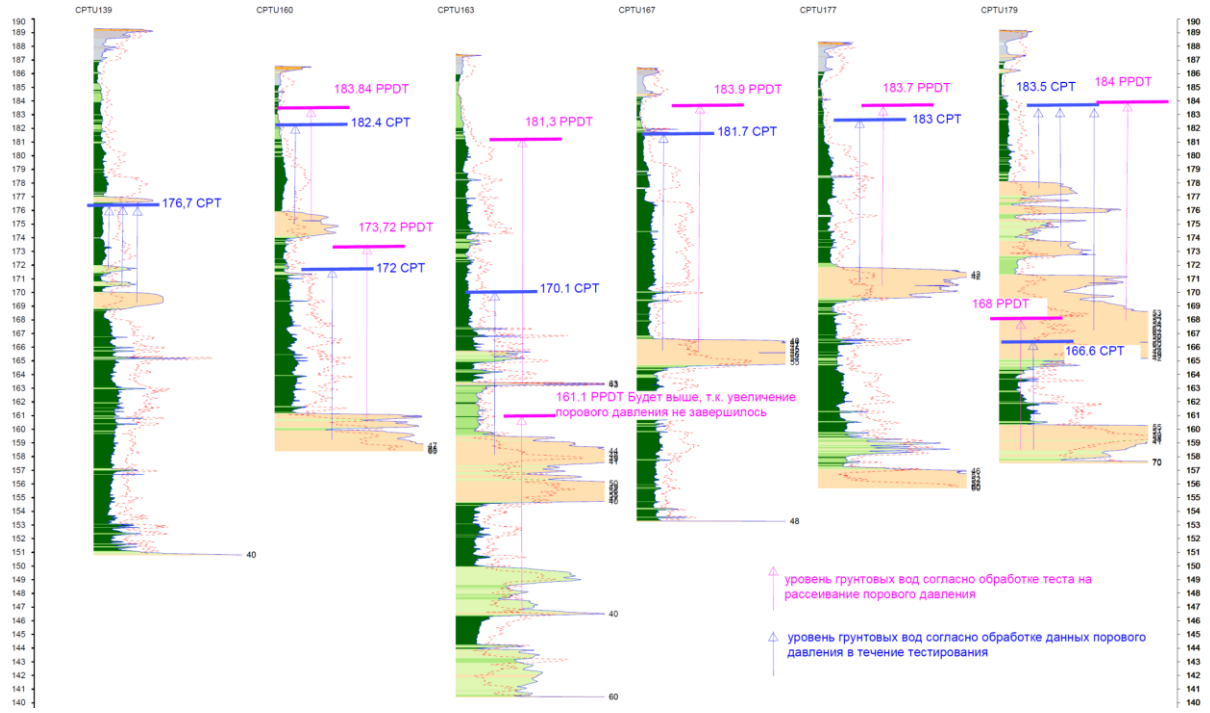

Рис. 4. Результаты измерений порового давления в массиве. Тесты по стабилизации порового давления проводились в песчаных грунтах. Их результаты совмещены с данными статического зондирования и измерений порового давления при внедрении пенетрометра. Вертикальные оси - абсолютные отметки, м. Горизонтальные оси - поровое давление, МПа

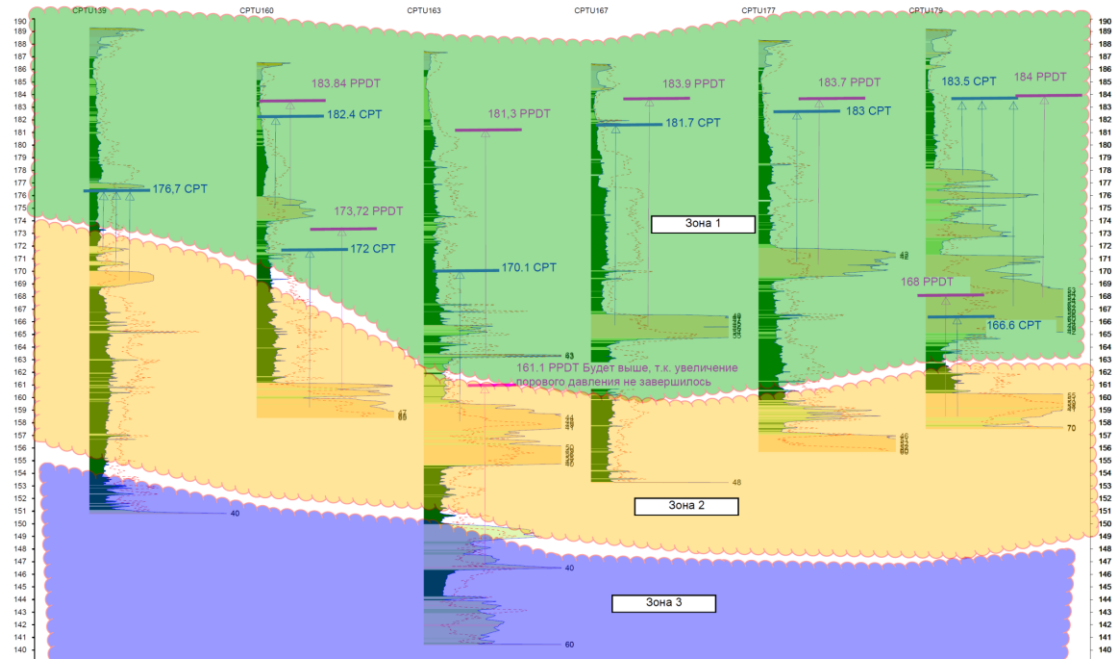

Рис. 5. Интерпретация результатов измерений порового давления, выполненная на основе сопоставления данных статического зондирования и полученных значений гидростатического порового давления на разных глубинах. Разными цветами выделены отдельные уровни подземных вод. Вертикальные оси - абсолютные отметки, м. Горизонтальные оси - поровое давление, МПа

Поровое давление, которое изменяется при вдавливании конуса, помогает более точно выполнять интерпретацию типа грунта, в песчаных грунтах оценивать гидростатическое давление. Эти данные также используются для коррекции лобового сопротивления, так как на его измеряемую величину оказывает влияние поровое давление. Степень влияния порового давления на изме-

ряемое лобовое сопротивление связана с конструкцией конуса и указывается производителем в калибровочном сертификате. Подобная коррекция важна при испытаниях слабых грунтов, для которых ее значение сопоставимо с измеряемыми величинами сопротивления под острием конуса.

Выполнение статического зондирования с измерением удельной электропроводности грунта (RCPT)

При зондировании RCPT используется конус со встроенной парой электродов (рис. 6). Данные регистрируются с частотой 2 Гц, что дает детальные результаты до глубины завершения тестирования.

Рис. 6. Конус для статического зондирования с измерением удельной электропроводности грунта (RCPT)

Значения удельной электропроводности связаны с влажностью, типом грунта, его составом. Изменение электропроводности грунта (появление аномалий) под действием загрязнителей делает возможным выполнение инженерно-экологических работ по обнаружению и оконтуриванию мест присутствия этих загрязнителей в исследуемом массиве.

В практике инженерно-геологических работ получаемые при RCPT данные напрямую используются для оценки коррозионной активности грунтов и уточнения результатов интерпретации данных статического зондирования. Совместный анализ данных по электропроводности и результатов статического зондирования значительно повышает достоверность интерпретации полученных материалов.

Также возможно применение модификации RCPT как опорного метода в сочетании с большим количеством поверхностных геофизических наблюдений методами электроразведки, к примеру ВЭЗ.

Значительный интерес представляет использование метода RCPT для выделения зон мерзлого грунта и исследования засоленных грунтов.

Сейсмостатическое зондирование (статическое зондирование с измерением скоростей волн сдвига в грунте - SCPT)

Модификация SCPT совмещает методы статического зондирования и сейсмического каротажа, выполняется конусами со встроенными группами геофонов.

Конусы нового поколения состоят из двух групп геофонов с фиксированным расстоянием между группами и оцифровкой сейсмического сигнала в конусе.

Тестирование выполняется с прерыванием вдавливания конуса на запланированных глубинах, созданием сейсмического возбуждения на поверхности (рис. 7), регистрации, накопления и сохранения получаемых данных в сейсмической станции. Общая схема выполнения SCPT показана на рис. 8. Фактические результаты представлены на рис. 9.

При проведении тестирования SCPT обеспечивается отличный контакт сейсмических датчиков с грунтом, что создает идеальные условия для геофизических измерений.

Рис. 7. Создание сейсмического сигнала

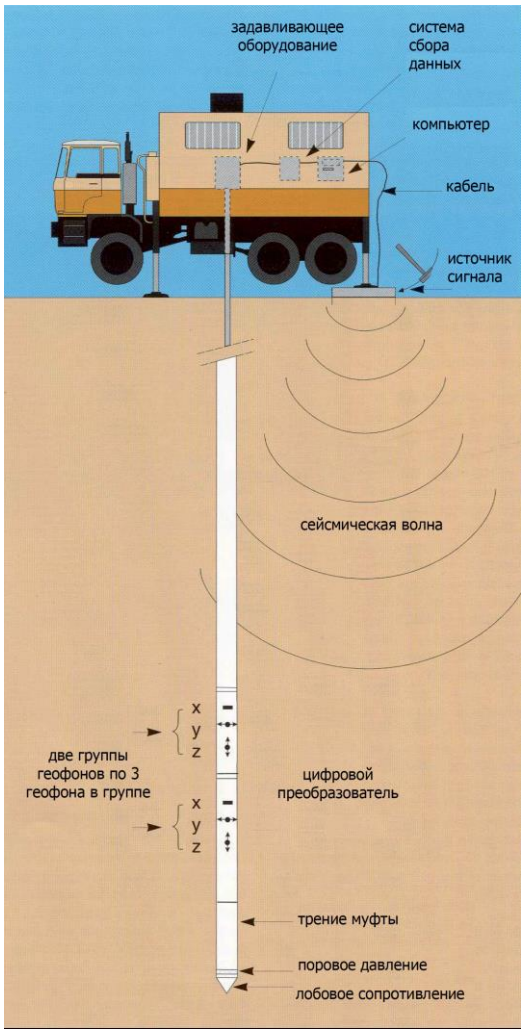

Рис. 8. Общая схема SCPT

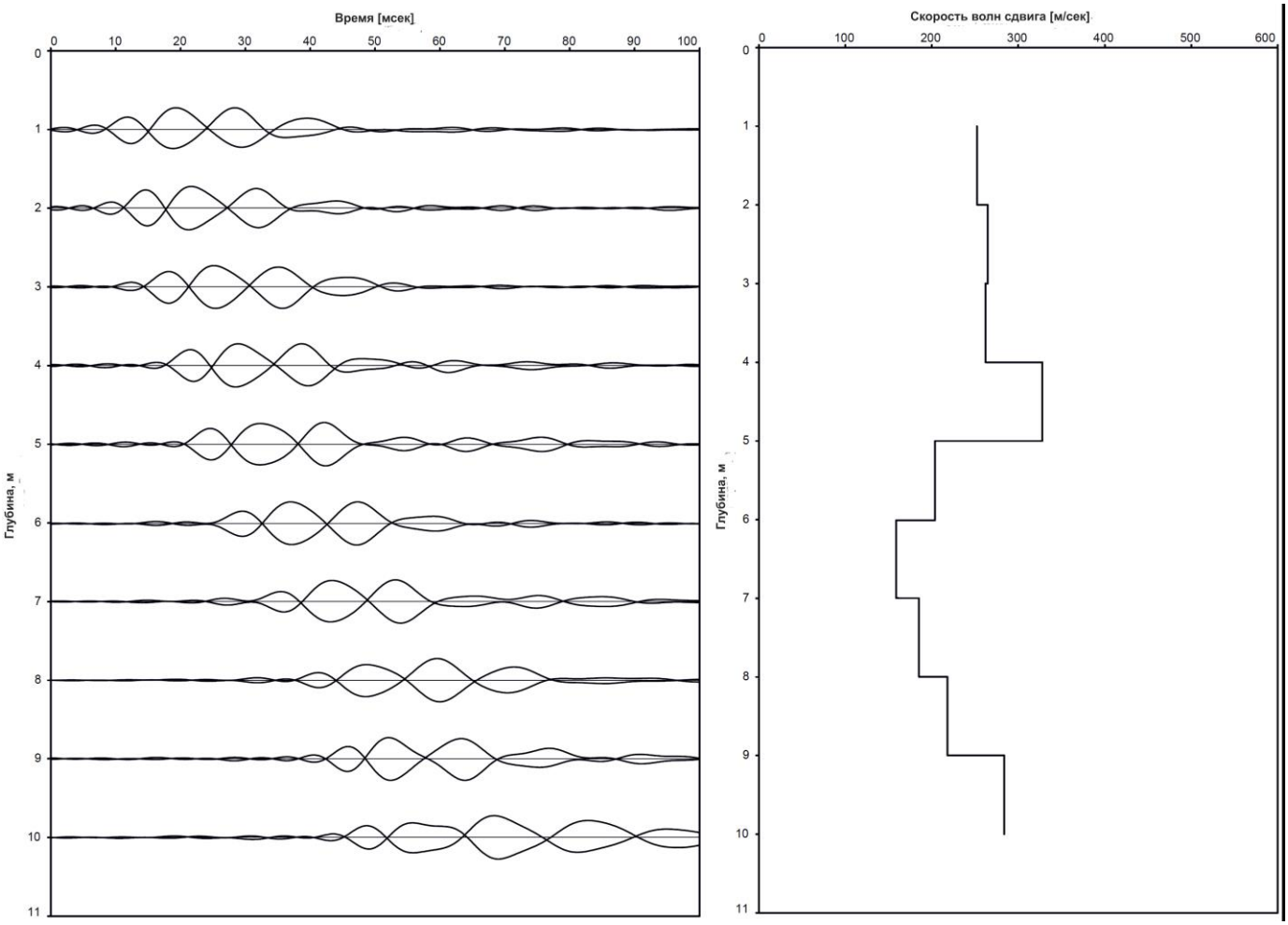

Рис. 9. Фактические результаты SCPT

Измеренная скорость волн сдвига в грунте используется во множестве геотехнических расчетов (динамического модуля сдвига, приращений сейсмической интенсивности, деформационных свойств грунта - перехода от динамического модуля к статическому и пр.).

По опыту проведения подобных работ в России и участия в тендерах можно утверждать, что стоимость сейсмостатического зондирования примерно в 5 раз ниже выполнения тестирования стандартными методами. Подобная экономичность достигается за счет исключения всех подготовительных работ. Оборудование доставляется к месту испытания вдавливанием.

Пространственный анализ данных

Время не стоит на месте, технологии стремительно развиваются. Наши сегодняшние мечты завтра могут оказаться реальностью. Современное программное обеспечение позволяет загружать и пространственно анализировать полученные данные, обеспечивая совместный анализ различных наборов данных и результатов геотехнических расчетов. Примеры представлены на рис. 10-12. В примере, представленном на рис. 12, в единой модели объединены несколько инженерно-геологических разрезов. Их совместное представление позволяет отобразить данные в наиболее понятном для понимания виде. Также на разные абсолютные уровни могут быть вынесены дополнительная информация и расположение сооружений.

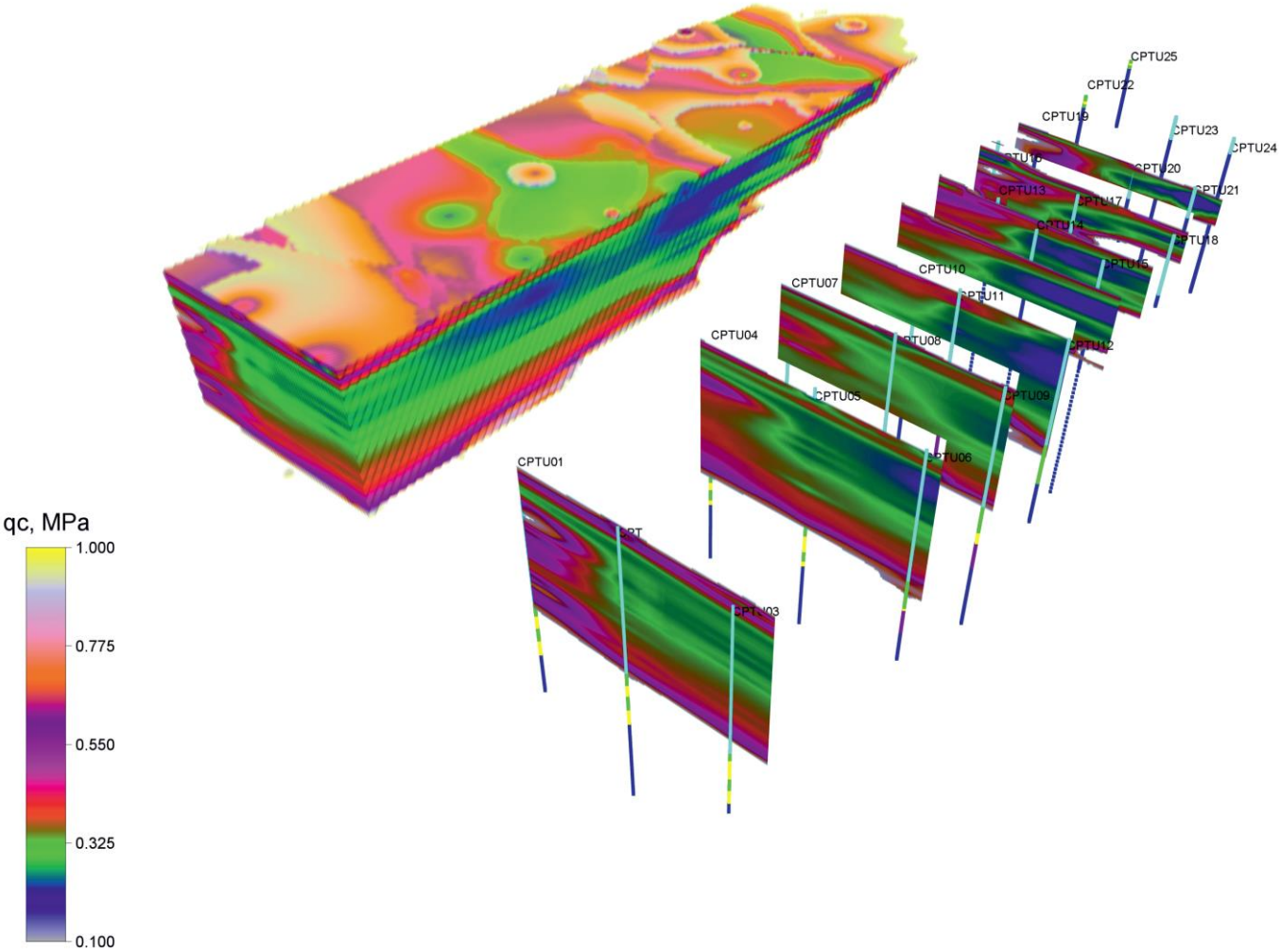

Рис. 10. Анализ уплотнения слабого глинистого грунта под автомобильной насыпью (q_c - сопротивление внедрению конуса, МПа). Обработка данных позволила проанализировать и визуализировать распределение значений лобового сопротивления в массиве грунта. В представленном виде уплотнение грунта под действием дополнительной нагрузки прослеживается точно под осью дороги (точки 01, 04, 07, 22). В левой части рисунка представлена общая модель слабого грунта, в правой вынесены выработки с разделением на инженерно-геологические элементы и отдельные секции из подготовленной модели

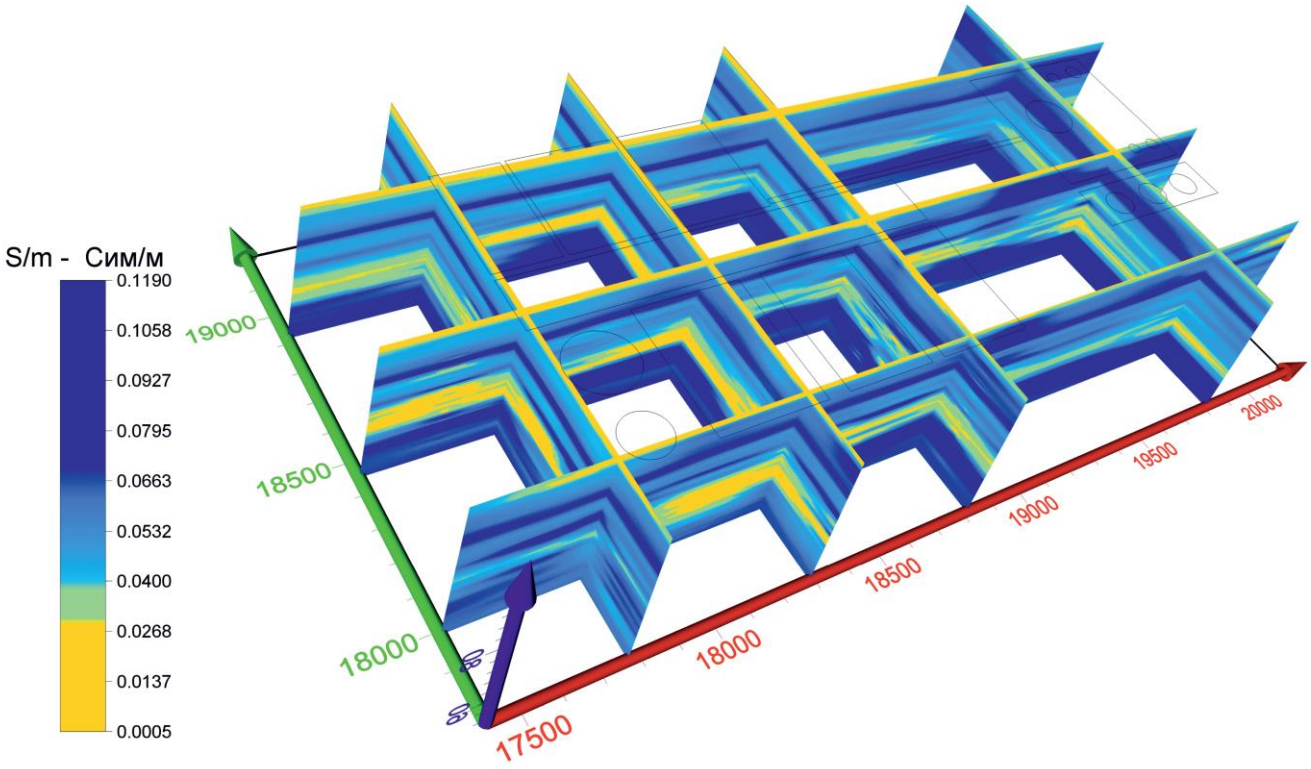

Рис. 11. 3D модель грунтовых условий по данным RCPT, выполненная на основе значительного количества полевых испытаний с измерением электропроводности грунта. На основе полученных результатов проведена интерпретация грунтовых условий на значительной площади, смоделирован весь массив грунта на глубину до 40 м от поверхности. Программа обработки данных позволяет отобразить полученные значения в любой точке смоделированного массива и построить разрезы в любом направлении. Разными цветами показаны различные типы грунта: желтым - песчаные, зеленым - супесчаные, голубым - суглинки, синим - глины. На модель нанесен обобщенный план расположения сооружений. Она выполнена в локальных координатах, активируется при выборе зоны ее расположения в pdf-версии при просмотре средствами Adobe Acrobat.

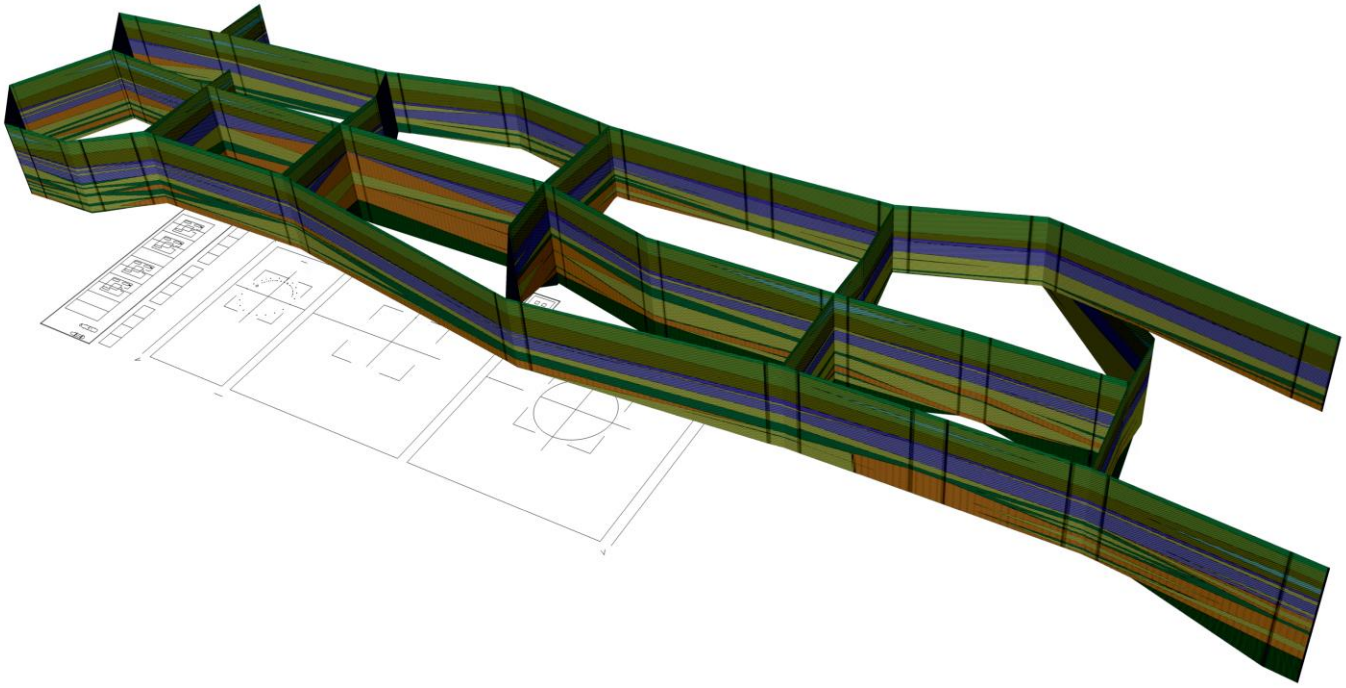

Рис. 12. Совмещение инженерно-геологических разрезов в пространственной модели грунтовых условий

Представленные примеры пространственного анализа грунтов выполнены на основе совместной интерпретации данных полевых исследований грунтов, бурения и лабораторных работ, но ключевую роль в создании 3D моделей играют данные полевых исследований - статического зондирования и его модификаций. Основных причин этому несколько:

- высокая достоверность данных (результаты были получены в массиве грунта);
- детальность (частота считывания данных 2 Гц позволяет собрать значительный объем информации, характеризующей массив);
- все получаемые данные точно привязаны в пространстве (имеют X, Y и Z координаты).

Создание пространственных моделей позволяет использовать в работе не стационарный фиксированный рисунок, а трехмерную (3D) модель, которую инженер-геолог или проектировщик могут настраивать в зависимости от решаемых задач.

Заключение

Статическое зондирование с использованием современного оборудования, специализированная установка для его выполнения и надлежащий контроль качества выполняемых работ - это мощный, производительный и надежный инструмент инженера-геолога. За счет использования модификаций CPT увеличивается как область применения этого метода, так и его экономическая эффективность. При этом установка статического зондирования постепенно модифицируется в многопрофильную базу для производства широкого спектра работ.

Не только статическое зондирование за последние десятилетия совершило значительный рывок вперед, но и методы и оборудование для лабораторных работ, оборудование для проведения опробования и геофизических работ.

Так как все методы инженерной геологии взаимосвязаны, они всегда должны использоваться комплексно, с учетом конкретных грунтовых условий, а также ограничений каждого метода. Грамотное их сочетание и совместный анализ получаемых результатов - залог успеха в исследовании площадки работ.

Современные программы обработки данных позволяют эффективно проводить их комплексный анализ, создавать динамические 3D модели, фокусирующие внимание на интересующих деталях. Передовые полевые методы исследований грунта и комплексы обработки данных значительно облегчают принятие взвешенных технически и экономически обоснованных проектных решений за счет повышенной детализации получаемой информации о грунтовом массиве и облегчения ее комплексного анализа.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №8/2013, С. 40-45