

# **Полевые испытания грунтов дилатометром Марчетти**

Гуськов И. А., инженер, ООО “Геоинжсервис”

## **Аннотация**

Данная статья описывает новый для отечественной практики полевой метод исследования грунтов – испытания сейсмическим дилатометром Marchetti (SDMT). В статье кратко описаны оборудование, методика испытаний, получаемые результаты, а также проведено их сравнение с результатами других методов исследования (полевых и лабораторных).

## **Проведение испытаний**

Дилатометрические испытания являются тестом на вдавливание, то есть не требуют бурения лидерной скважины, что значительно сокращает длительность и стоимость работ, а также (благодаря этому и особой форме лезвия) позволяет исследовать грунт в условиях его естественного залегания с минимальным нарушением целостности.

Вдавливание лезвия дилатометра может производиться как при помощи установки статического зондирования (что является наилучшим вариантом для достижения максимальной глубины), так и с использованием буровой установки. Существуют и другие варианты вдавливания, например, при помощи легкой зондировочной установки (рис. 1).

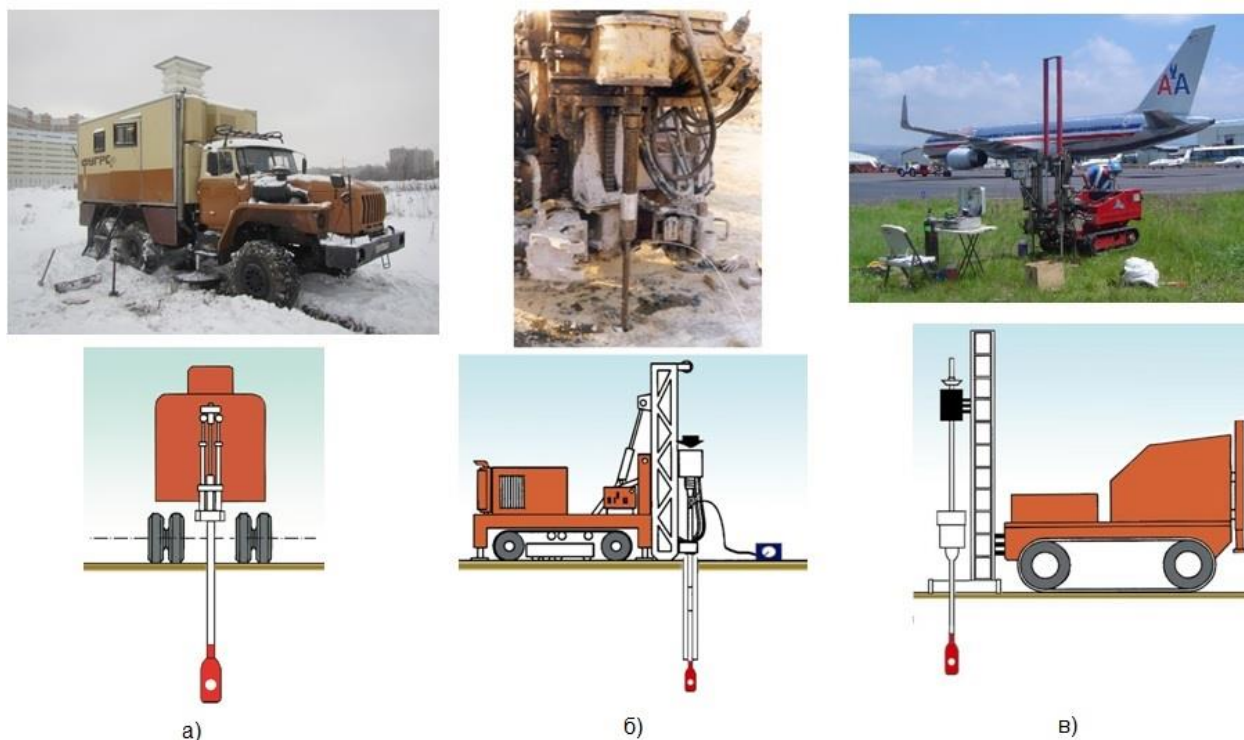


Рис. 1. Методы вдавливания дилатометра Marchetti: а) тяжелой установкой статического зондирования; б) буровой установкой; в) легкой зондировочной установкой

Вдавливание производится при помощи стандартных СРТ штанг, через которые пропущен пневматико-электрический кабель, соединяющий лезвие дилатометра, находящееся в грунте, с блоком управления и газовым баллоном, находящимися на поверхности (рис. 2).

Каждые 20 см вдавливание прекращается и производится непосредственно тест. С помощью блока управления из баллона к лезвию дилатометра под давлением подается газ (чаще всего используются сжатый азот или воздух). Под этим давлением круглая стальная мембрана, расположенная на одной из сторон лезвия, начинает расширяться в сторону грунта (в горизонтальном направлении). В процессе испытания записывается два давления:  $P_0$  – давление начала расширения мембраны и  $P_1$  – давление, при котором расширение мембраны достигает 1.1 мм. После этого давление из системы сбрасывается, и вдавливание продолжается до следующей глубины тестирования. Каждый тест занимает около 1 минуты. Оборудование компьютеризировано, запись значений ведется автоматически. Стоит отметить, что данное оборудование позволяет нагнетать в систему давление газа до 8 МПа, что является вполне достаточным для испытаний практически всех дисперсных грунтов.

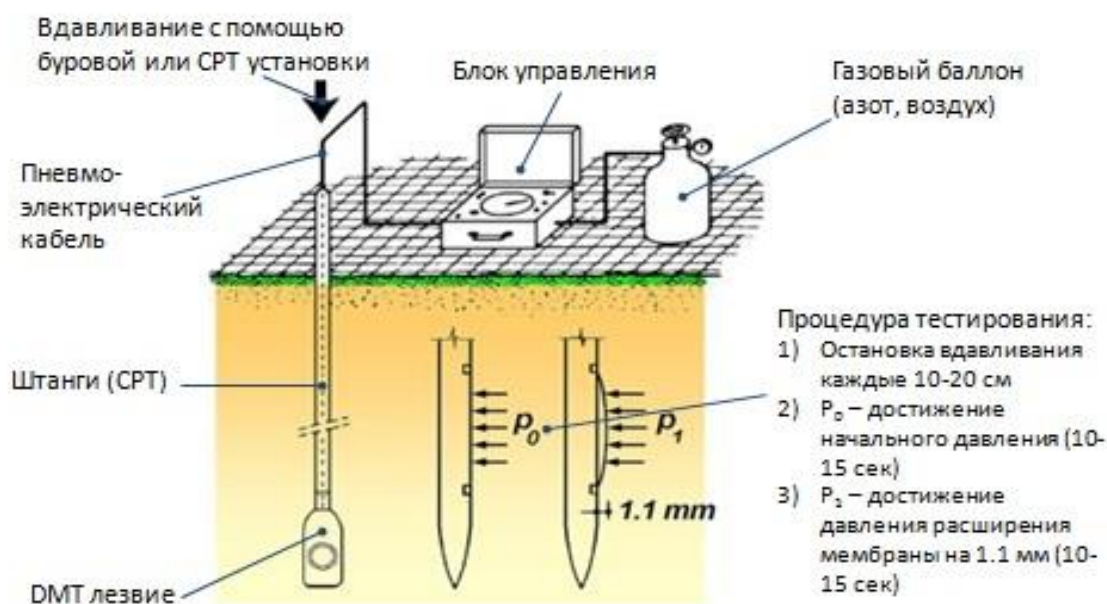


Рис. 2. Базовая схема работы дилатометра

### Определяемые параметры

В процессе обработки результатов по полученным данным давлений  $P_0$  и  $P_1$  рассчитываются так называемые промежуточные параметры. Среди них:

- индекс материала  $I_D$  – показатель, на основе которого определяется тип грунта;
- $K_D$  – дилатометрический индекс бокового давления в грунте. Необходимо отметить, что не стоит путать этот параметр с коэффициентом бокового давления покоя в грунте  $K_0$ .
- $E_D$  – дилатометрический модуль. Параметр рассчитывается при решении задачи теории упругости и характеризует деформацию грунта в горизонтальном направлении.

На основе промежуточных параметров рассчитываются конечные:

а. Вертикальный модуль деформации  $M_{DMT}$ . Данный модуль деформации позиционируется разработчиками как одометрический и рассчитывается как дилатометрический модуль  $E_D$ , умноженный на некий коэффициент  $R_M$ . В этом коэффициенте помимо значений индекса материала и индекса бокового давления учтена и поправка на анизотропию грунта.  $M_{DMT}$  позволяет уйти от заниженных расчетных модулей деформации, которые, что не секрет, рассчитываются проектировщиками с большим коэффициентом запаса, и, соответственно, снизить стоимость строительства временами на порядок.

б. Сопротивление недренированному сдвигу  $C_u$ .

с. На основе дилатометрического индекса бокового давления могут быть найдены коэффициент бокового давления  $K_0$  и коэффициент переуплотнения OCR.

d. Для песчаных грунтов может быть рассчитан угол внутреннего трения  $\varphi$ .

e. Также для всех типов грунтов существует методика оценки их объемного веса.

В таблице 1 приведены основные параметры грунта, рассчитываемые при помощи дилатометра Marchetti, а также используемые корреляционные формулы. Помимо вышеперечисленного, в процессе испытаний может проводиться тест на рассеивание порового давления в глинистых грунтах, а также измерения порового давления песке.

Диапазон исследуемых данным методом грунтов весьма широк. Тестируются песчано-глинистые разности (диаметр частиц исследуемых грунтов не должен превышать диаметр мембраны дилатометра, который составляет 60 мм). Лезвие дилатометра является очень прочным и может выдержать до 25 тонн вертикальной нагрузки. Модуль деформации может быть измерен в интервале от 0.5 до 400 МПа, а сопротивление недренированному сдвигу от 2 кПа до 1 МПа, что соответствует консистенции глинистых грунтов от текучей до твердой.

Таблица 1. Основные получаемые параметры и формулы расчета

Символ	Описание	Основные DMT формулы с объяснением	
$p_0$	Начальное давление	$p_0=1.05*(A-Z_M+\Delta A) - 0.05*(B-Z_M-\Delta B)$	$Z_M$ =Нулевое давление. Если $\Delta A$ и $\Delta B$ измерены при одном нулевом давлении, то для расчета A и B, использовать $Z_M=0$ ( $Z_M$ компенсировано)
$p_1$	Конечное давление	$p_1=B-Z_M-\Delta B$	
$I_D$	Коэффициент материала	$I_D=(p_1-p_0)/(p_0-u_0)$	$u_0$ =Поровое давление
$K_D$	Дилатометрический индекс бокового давления	$K_D=(p_1-p_0)/\sigma'_{v0}$	$\sigma'_{v0}$ =геостатическое давление перед внедрением
$E_D$	Дилатометрический модуль деформации	$E_D=34.7(p_1-p_0)$	$E_D$ это НЕ модуль Юнга E. $E_D$ должен быть использован только ПОСЛЕ комбинации с $K_D$ (История Напряжений). В первом приближении $M_{DMT}=R_M E_D$
$K_0$	Коэффициент бокового давления в состоянии покоя	$K_{0,DMT}=(K_D/1.5)^{0.47}-0.6$	для $I_D < 1.2$
OCR	Коэффициент переуплотнения	$OCR_{DMT}=(0.5K_D)^{1.56}$	для $I_D < 1.2$
$c_u$	Недренированное сопротивление сдвигу	$c_{u,DMT}=0.22\sigma'_{v0}(0.5K_D)^{1.25}$	для $I_D < 1.2$
$\varphi$	Угол внутреннего трения	$\varphi_{DMT}=28^\circ + 14.6^\circ \log K_D - 2.1^\circ \log^2 K_D$	для $I_D > 1.8$
$c_h$	Коэффициент консолидации	$c_{h,DMT} \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{flex}$	$t_{flex}$ из графика рассеивания порового давления
$k_h$	Коэффициент фильтрации	$k_h=c_h \gamma_w / M_h$	$M_h \approx K_0 M_{DMT}$
$\gamma$	Объемный вес грунта	(диаграмма из TC16)	
M	Вертикальный дренированный компрессионный модуль	$M_{DMT}=R_M E_D$	
		if $I_D \leq 0.6$	$R_M=0.14+2.36 \log K_D$
		if $I_D \geq 3$	$R_M=0.5+2 \log K_D$
		if $0.6 < I_D < 3$	$R_M=R_{M,0}+(2.5-R_{M,0}) \log K_D$ with $R_{M,0}=0.14+0.15(I_D-0.6)$
		if $K_D > 10$	$R_M=0.32+2.18 \log K_D$
if $R_M < 0.85$	set $R_M=0.85$		
$u_0$	Стабилизированное поровое давление	$u_0=p_2-C-Z_M+\Delta A$	В свободно дренируемых грунтах

## Нормативная база

Методика испытаний и расчет параметров грунта подробно описаны в международных нормативных документах, таких как Еврокод 7 и ASTM. Что касается отечественных нормативов, то в ГОСТ 20276-2012 Приложение В – Метод испытания плоским дилатометром описываемая методика и используемое оборудование несколько отличается от разработанных Marchetti, однако суть испытаний при этом остается той же.

## Сопоставление с другими методами исследования

Корреляционные взаимосвязи между исходными и итоговыми параметрами были получены разработчиками данного оборудования при исследовании некоторой весьма широкой, но при этом ограниченной выборки грунтов. Таким образом, одной из целей исследований является подтверждение возможности использования корреляционных связей, полученных за рубежом, для испытаний наших грунтов. Для этого компанией ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» была проведена серия испытаний грунтов московского региона различными методами для сравнения полученных результатов.

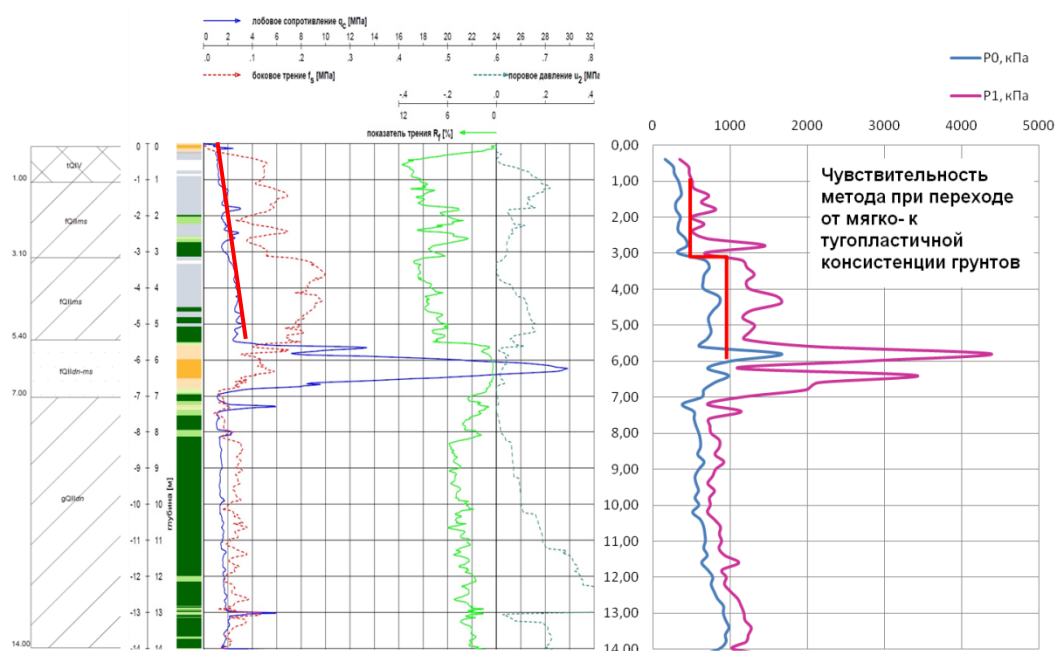


Рис. 3. Сравнение исходных данных СРТ и DMT

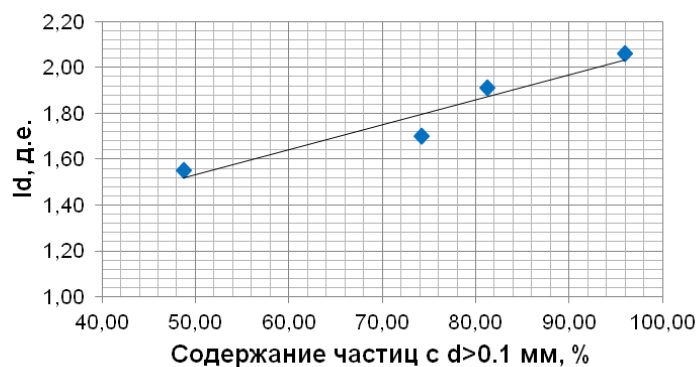
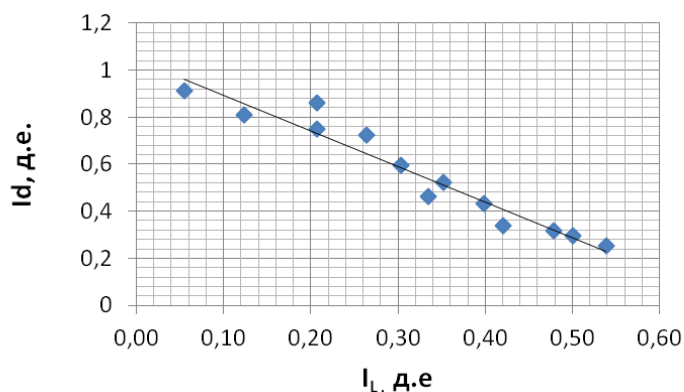
На рисунке 3 представлено сравнение исходных данных сопоставляемых методов (лобовое сопротивление погружению конуса и трение по боковой поверхности в случае статического зондирования и начальное и конечное давление  $P_0$  и  $P_1$  в случае испытаний дилатометром). На графиках хорошо видно, что дилатометр является более чувствительным инструментом к изменению грунтовых условий. Так для верхнего участка разреза, где мягкопластичные суглинки переходят в тугопластичные, изменение

лобового сопротивления на графике статического зондирования аппроксимируется прямой, в то время как данные испытаний дилатометром изменяются скачкообразно, что позволяет более качественно и точно определить, во-первых, тип грунта и, во-вторых, его характеристики.

### Индекс материала

Далее хотелось бы внести некоторую ясность в такой дилатометрический параметр как индекс материала ( $I_D$ ). В зарубежной практике, на основе этого параметра производят разделение грунтов на глинистые и песчаные. Индекс материала оценивается по разнице между начальным и конечным давлениями  $P_0$  и  $P_1$ . При этом для глинистых грунтов характерно близкие значения между этими давлениями, а для песчаных разница между ними существенно больше.

Но, несмотря на то, что определение типа грунта данным методом в целом не вызывает сомнений, по проведенным нами исследованиям нет прямой зависимости индекса материала глинистых грунтов от результатов, например, гранулометрических анализов или числа пластичности грунта. Однако при более глубоком анализе лабораторных данных была найдена достаточно четкая обратная зависимость индекса материала от показателя пластичности (рис. 4а). Индекс материала практически линейно уменьшается при переходе от полутвердой консистенции глинистых грунтов к мягкопластичной. Что касается песчаных грунтов (индекс материала для которых



варьирует от 1.8 до 10), была определена его взаимосвязь с содержанием в грунте частиц диаметром более 0.1 мм (такой диаметр был выбран ввиду того, что испытаниям подверглись, в основном, мелкие пески). Рисунок 4б показывает, что зависимость существует и она практически линейная.

Рис. 4. Взаимосвязь индекса материала с результатами лабораторных исследований: а) с показателем пластичности для глинистых грунтов; б) с содержанием частиц грунта диаметром более 0,1 мм для песчаных

Понимание физической природы этого параметра очень важно, так как на его основе рассчитываются многие параметры, в том числе Модуль деформации  $M_{DMT}$ .

### Модуль деформации

Что касается определения непосредственно модуля деформации грунтов, то на исследовательской площадке в Москве был проведен комплекс испытаний с последующим сопоставлением полученных результатов. На рисунке 5 показано сравнение модулей деформации для нижней, достаточно однородной части разреза (моренных суглинков), полученных с помощью разных методов: собственно испытаний дилатометром, статического зондирования, компрессионных (умноженных на коэффициент  $m_k$  из таблицы 5.1 СП 22.13330) и испытаний в приборе трехосного сжатия. На графике видно, что результаты дилатометрических испытаний хорошо сходятся с лабораторными исследованиями. Что касается модуля деформации определенного по данным статического зондирования, то он хорошо характеризует толщу в целом, не так сильно реагируя на неоднородности. Сравнение с результатами статического зондирования еще раз показывает, что дилатометр является более чувствительным инструментом к изменению параметров грунта.

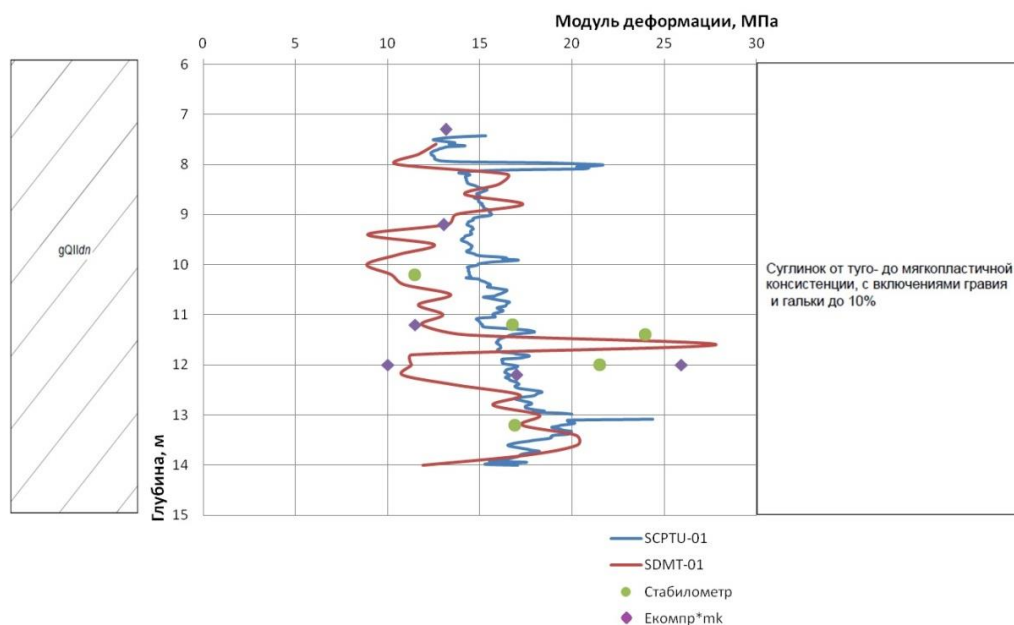


Рис. 5. Результаты определения модуля деформации различными полевыми и лабораторными методами

На рисунке 6 показано сравнение модуля деформации, полученного из данных дилатометрических испытаний с результатами испытаний плоским штампом 600-го

диаметра в скважине. Испытания проводились в флювиогляциальных и моренных суглинках. Высокая сходимость результатов и анализ данных, приведенных на рисунке 5, позволяют сделать вывод (во всяком случае, для исследованных грунтов) о том, что модуль деформации, полученный по результатам испытаний дилатометром:

- во-первых, по уровню значений соответствует модулям деформации, полученным из штамповых испытаний и при лабораторных исследованиях в стабилометре,

- и, во-вторых, является высокочувствительным инструментом к изменениям грунтовых условий,

а значит, может и должен быть рекомендован для использования при оценке деформационных свойств грунтов, расчета осадки и выбора типа фундамента.

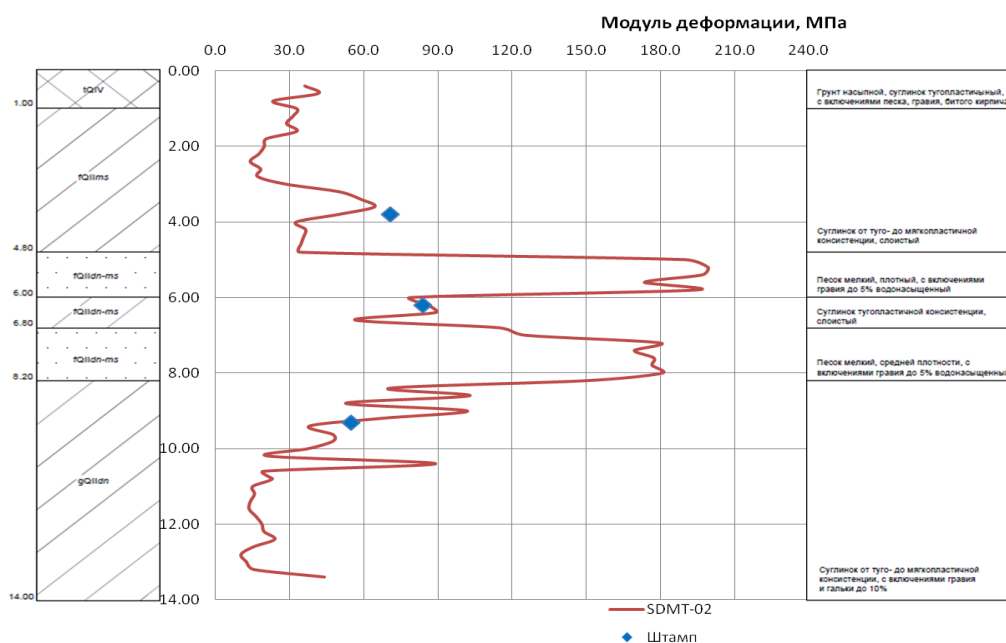


Рис. 6. Результаты определения модуля деформации с помощью дилатометрических и штамповых испытаний

### Коэффициенты бокового давления и переуплотнения

Отдельное внимание также хотелось бы уделить таким параметрам грунта, как коэффициент бокового давления  $K_0$  и коэффициент переуплотнения OCR. Испытания дилатометром наиболее точно позволяют оценить эти характеристики, ввиду того, что в процессе исследований непосредственно измеряется горизонтальное давление, оказываемое грунтом на мембрану дилатометра, а значит, становится возможным переход к горизонтальным напряжениям в массиве грунта. Из этого предположения и ряда экспериментов разработчиками метода были выведены зависимости  $K_0$  и OCR от дилатометрического индекса бокового давления, которые позднее были подтверждены



различными исследователями на многих экспериментальных площадках (рис. 7). Помимо этого становится возможной комплексная оценка напряженного состояния в массиве грунта.

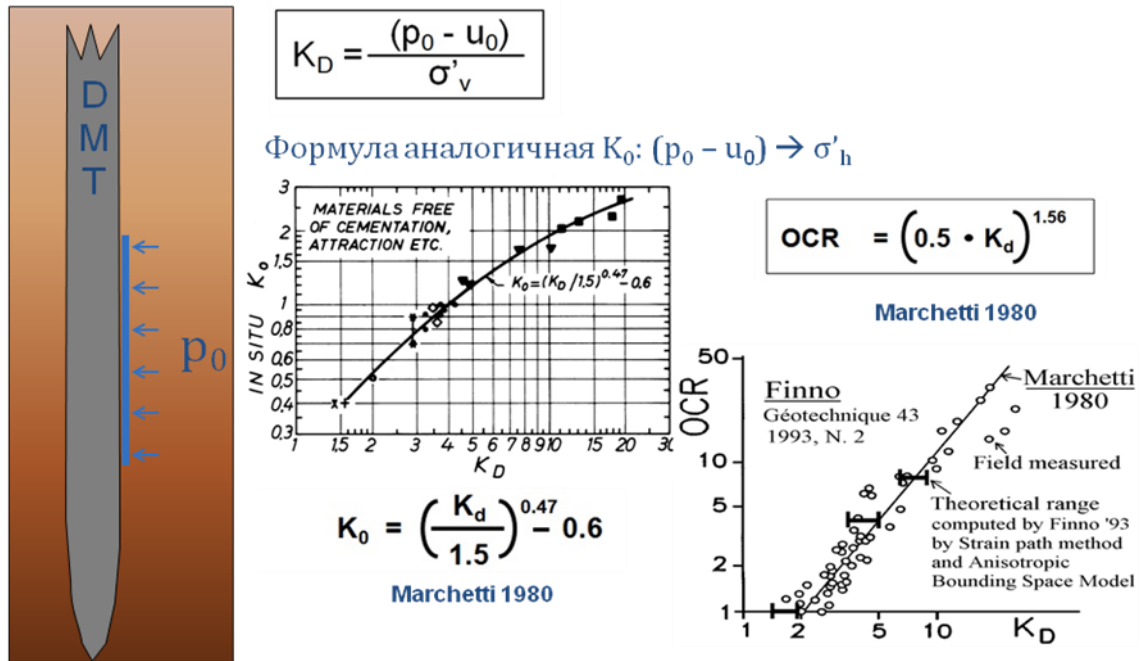


Рис. 7. Оценка  $K_0$  и OCR по данным дилатометра Marchetti

### Сейсмический дилатометр Marchetti (SDMT)

Помимо стандартных DMT испытаний могут также проводиться испытания сейсмическим дилатометром, который представляет собой комбинацию дилатометра с сейсмическим модулем. Модуль технически располагается непосредственно за лезвием и включает в себя 4 датчика: 2 для регистрации поперечных волн и 2 для регистрации продольных.

На рисунке 8 изображена базовая схема работы SDMT. Для определения скорости поперечных волн испытания проводятся каждые 0,5 м. На земной поверхности возбуждается поперечная волна при помощи удара в горизонтальном направлении (параллельно земле) кувалды по сейсмической плите. В грунте время прихода волны записывается двумя датчиками с фиксированным расстоянием между ними, между которыми и рассчитывается скорость поперечных волн – метод Истинного интервала.

Определение скорости продольных волн производится схожим образом, только удар производится вертикально (перпендикулярно к земной поверхности).

Кроме того, существует методика определения скоростей волн сдвига в скальных грунтах. Для этого бурится скважина необходимой глубины, засыпается чаще всего песчаным однородным материалом, в который вдавливаются сейсмический дилатометр. Далее процедура сейсмического теста аналогична вышеописанной. Расчет поперечных волн сдвига для скальных грунтов становится возможным ввиду одинакового расстояния прохождения сейсмической волны в искусственном песчаном грунте, а значит, измеряется разница времени прохождения сейсмических волн именно в скальном грунте.

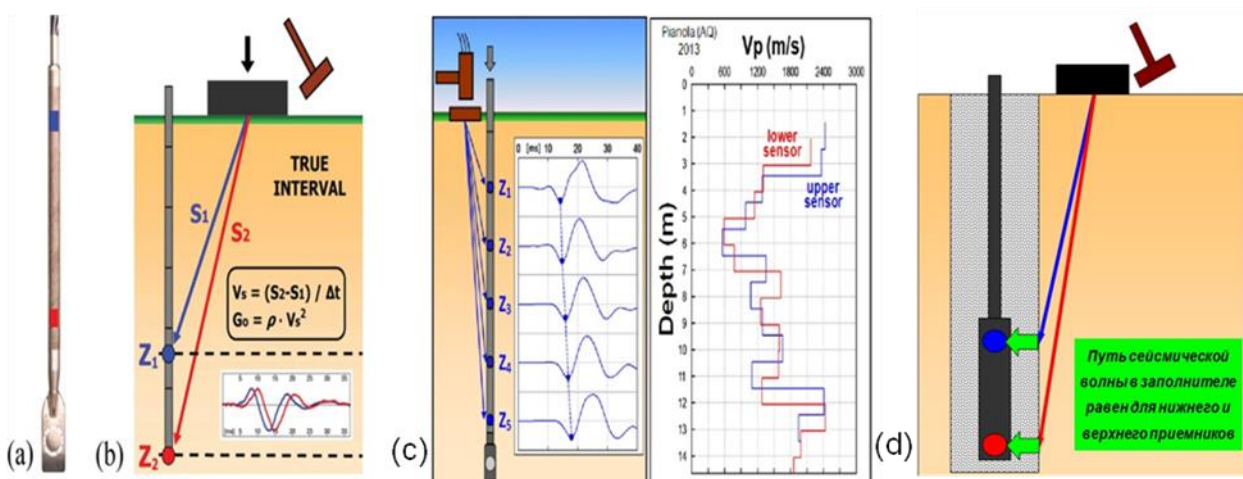


Рис. 8. Базовая схема SDMT: (a) DMT лезвие и сейсмический модуль; (b) Общая схема теста ( $V_s$ ); (c) Общая схема теста ( $V_p$ ); (d) Определение  $V_s$  для скальных грунтов

В рамках исследовательской программы компании ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» были подвергнуты сравнению данные о скорости поперечных волн сдвига, определенных трех сейсмических систем (с помощью SDMT, а также цифровой и аналоговой системы сейсмостатического зондирования). Как видно на рисунке 9 профили скоростей сейсмических волн на всех глубинах исследования обладают хорошей сходимостью.

Стоит отметить, что благодаря измерению как скоростей поперечных волн сдвига в грунте, так и продольных волн сжатия-расширения, становится возможным расчет не только максимального модуля сдвига  $G_{max}$ , но и такого показателя как коэффициент Пуассона, с помощью которого, в свою очередь, можно перейти к максимальному модулю упругости  $E_{max}$ .

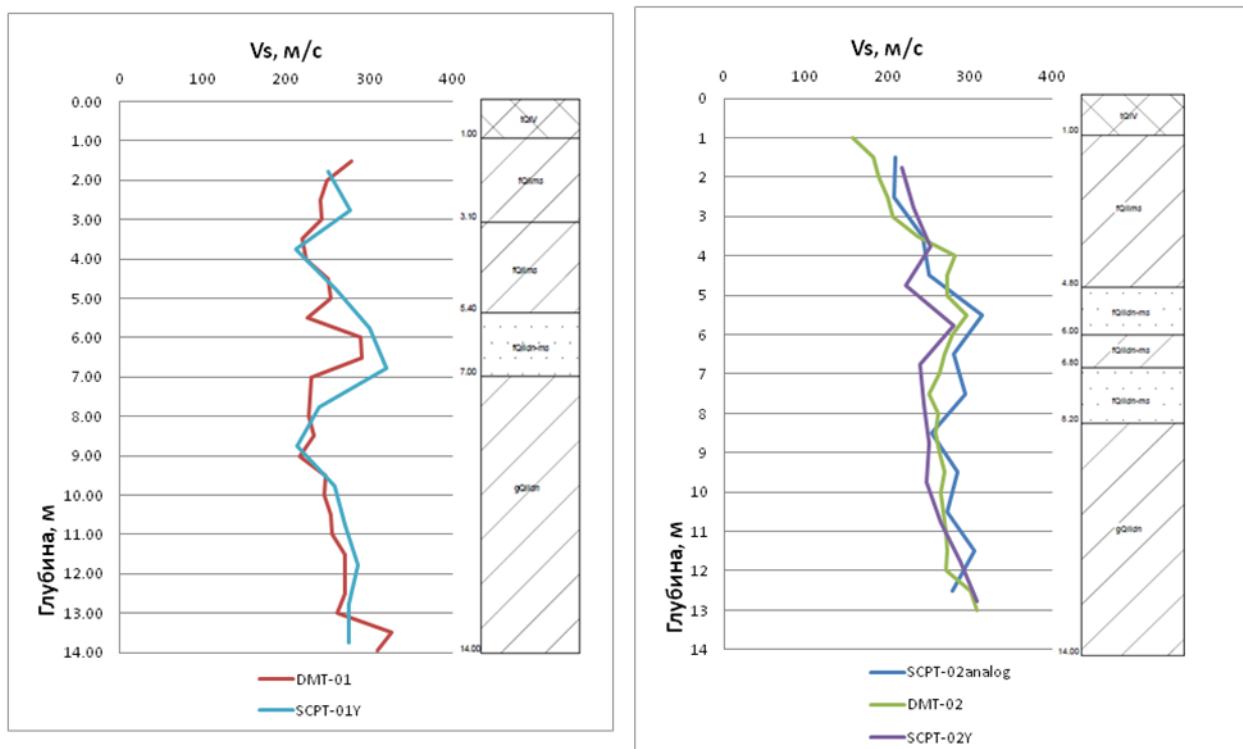


Рис. 9. Сравнение результатов испытаний трех сейсмических систем SCPTu и SDMT.

### Выводы

Итак, исследования показали, что с помощью сейсмического дилатометра могут быть оценены некоторые характеристики, обладающие хорошей сходимостью с результатами других полевых и лабораторных методов исследования грунтов. А именно может быть определен тип грунта, оценены его модуль деформации, коэффициент бокового давления, коэффициент переуплотнения, объемный вес, угол внутреннего трения, сопротивление недренированному сдвигу и некоторые другие параметры. С помощью сейсмической модификации метода могут быть получены скорости продольных поперечных волн в грунте, а также рассчитаны максимальные модули сдвига и упругости, оценен коэффициент Пуассона. Необходимо понимать, что характеристики, в основном, определяются в коридоре значений, для некоторых в узком (как для модуля деформации), а для некоторых может быть проведена только оценка (например, для объемного веса или коэффициентов консолидации и фильтрации). Но, тем не менее, результаты испытаний сейсмическим дилатометром Marchetti являются весьма информативными.

## **Заключение**

В заключение хотелось бы описать ближайшие цели, которые видятся в применении дилатометра Marchetti в ближайшем будущем:

- во-первых, это накопление большей базы данных, при исследовании различных грунтовых условий нашей необъятной страны, применение еще не изученных возможностей метода,

- во-вторых, продолжение сравнительного анализа дилатометрических данных с результатами других тестов (как полевых, так и лабораторных).

- в-третьих, это разработка или уточнение корреляционных связей для наших грунтовых условий, с учетом параметров и классификаций, применяемых в России.

- и наконец, естественно, использование дилатометра непосредственно для инженерных изысканий в комплексе с другими методами исследования для получения максимального представления о грунтовых условиях.