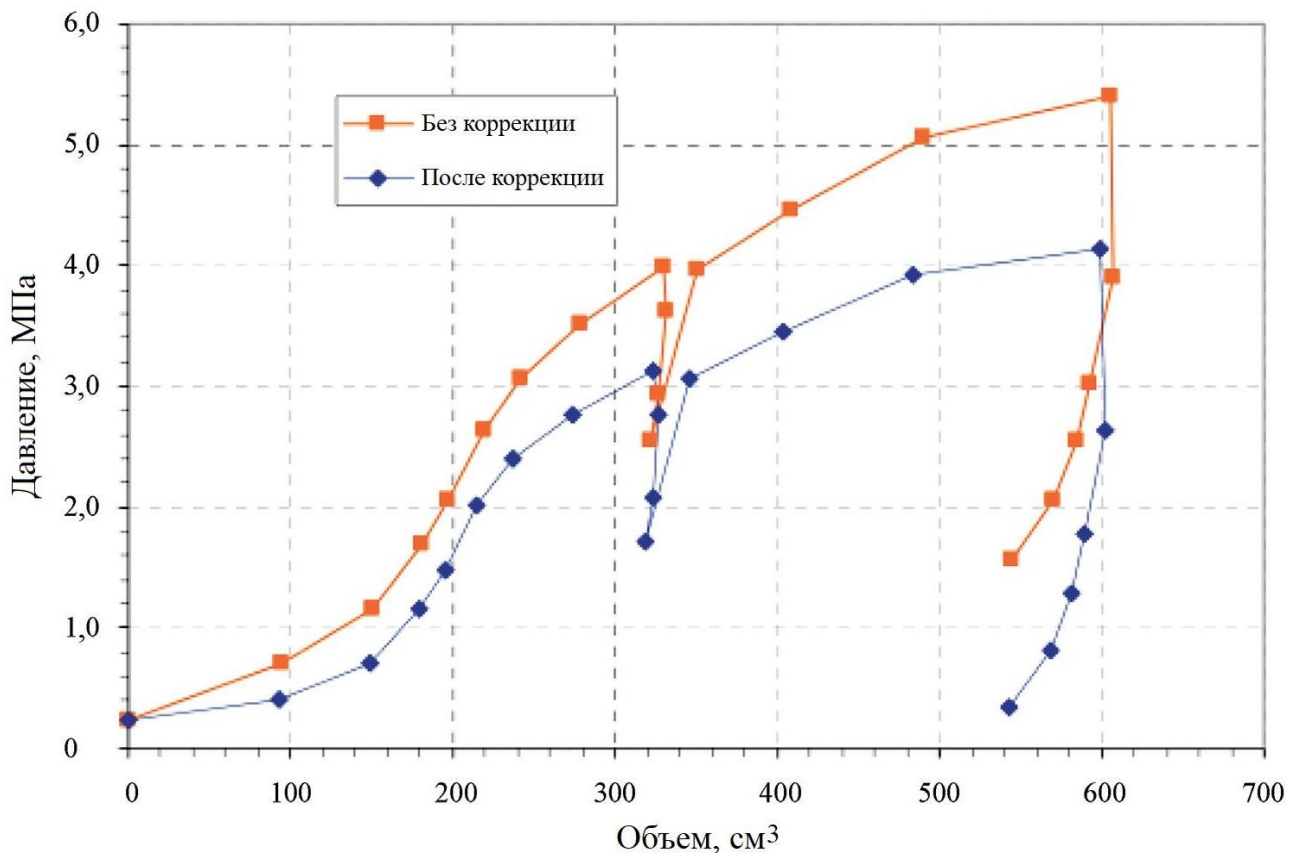


Прессиометрические испытания в Северной Америке: обзор. Часть 3



БЕНУА ЖАН (BENOIT JEAN)

Профессор кафедры гражданского строительства Университета Нью-Гемпшира, доктор наук, г. Дарем, шт. Нью-Гемпшир, США, jean.benoit@unh.edu

ХАУИ ДЖОН (HOWIE JOHN)

Доцент кафедры гражданского строительства Университета Британской Колумбии, доктор наук, г. Ванкувер, пров. Британская Колумбия, Канада, jahowie@civil.ubc.ca

В 2022 году по инициативе и при поддержке генерального директора ООО «Петромоделинг» Алексея Бершова редакция журнала «ГеоИнфо» продолжит знакомство читателей с методом прессиометрических испытаний грунтов. Данные испытания большинством изыскателей и проектировщиков воспринимаются как «более дешевая и простая альтернатива штамповых испытаний». На деле данная технология является уникальным методом испытаний грунтов в массиве. Она используется для определения как действующих горизонтальных напряжений и коэффициента K_0 (без которого, как известно, невозможны оценка начального (природного) состояния геологической среды и дальнейшие расчетные обоснования конструкций), так и физико-механических откликов геологической среды на горизонтальное

механическое воздействие. Например, таких как зависимость между напряжениями и деформациями и недренамированная прочность.

Как отмечает А. Бершов, понимание методов оценки напряженно-деформированного состояния массива грунтов очень важно для эффективного перехода к трехмерному моделированию геологической среды и построению ее инженерных цифровых моделей. Это базовая часть информационной цифровой модели объекта капитального строительства, без которой любые информационные проектные построения просто «повисают в воздухе».

Сегодня предлагаем вниманию читателей третью часть адаптированного перевода обзора [1] по полевым испытаниям грунтов с использованием прессиометров, написанного профессором кафедры гражданского строительства Университета Нью-Гемпшира Жаном Бенуа (США) и доцентом кафедры гражданского строительства Университета Британской Колумбии Джоном Хауи (Канада). Эта часть посвящена проблемам прессиометрических испытаний в Северной Америке. Нумерация рисунков и таблиц соответствует таковой в оригинальной статье [1].

Консультационную помощь редакции при подготовке адаптированного перевода оказали генеральный директор ООО «Петромоделинг» Алексей Бершов и другие специалисты этой компании.

ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ В СЕВЕРНОЙ АМЕРИКЕ

Обзор соответствующей литературы говорит о том, что большинство прессиометрических испытаний в Северной Америке выполнялось с предварительным бурением скважины. Раннее тестирование с помощью самозабуривающегося прессиометра проводилось там в грунтах, в которые его можно было ввести с минимальными нарушениями их природного состояния и которые также подходят для испытаний *in situ* такими методами, как SPT, CPTu, крыльчаткой и плоским дилатометром (DMT). В таких грунтах прессиометрия не дает существенных преимуществ для геотехнического описания площадки по сравнению с другими типами испытаний, поэтому в то время преобладало использование других инструментов. В исследовательской же сфере прессиометрические тесты вызывали и продолжают вызывать большой интерес. Прессиометры также нашли свое применение в «нестандартных» материалах, то есть в первую очередь в мерзлых грунтах, во льду, в слабых и твердых скальных породах (Ladanyi, 1995), но было также проведено значительное количество испытаний и в других трудноизучаемых грунтах, таких как ледниковые морены, твердые глины, остаточные грунты и бытовые отходы.

Стандарты ASTM

Единственным стандартом ASTM, имеющим отношение к прессиометрическим испытаниям в Северной Америке, является ASTM D4719. Его текущая на момент выхода данного обзора версия была опубликована в 2007 году. Она касается испытаний прессиометром, вводимым в предварительно пробуренную скважину.

(ASTM – American Society for Testing and Materials, ASTM International – Американское общество по испытаниям и материалам, ставшее международной некоммерческой организацией, разрабатывающей и издающей добровольные стандарты для материалов, продуктов, систем и услуг. – *Ред.*)

Сфера применения вышеуказанного стандарта резюмируется в ASTM следующим образом:

«Этот метод охватывает испытания грунтов с помощью прессиометра.

Прессиометрическое испытание – это испытание in situ, определяющее зависимость «напряжение – деформация» и проводимое радиально расширяющимся цилиндрическим зондом, давящим на стенки скважины. Для получения надежных результатов испытаний необходимо минимизировать нарушения стенок скважины...

Этот метод испытаний включает в себя процедуры бурения скважины, установки зонда и проведения прессиометрических испытаний как в несвязных, так и в связных дисперсных грунтах, но не включает испытания скальных пород под высоким давлением. Знание типа грунта, в котором предстоит проводить каждое прессиометрическое испытание, необходимо: во-первых, для выбора метода бурения или размещения зонда (или для того и другого); во-вторых, для интерпретации данных испытаний; в-третьих, для обоснованности результатов тестирования».

Далее указывается, что этот метод не распространяется на использование самозабуривающегося прессиометра и ограничивается применением прессиометра, который вставляется в предварительно пробуренную скважину или, при определенных обстоятельствах, вводится в грунт забиванием (by driving).

В настоящее время нет стандарта ASTM для разновидностей испытаний, направленных на определение основных параметров грунта.

В других местах мира (точнее, в Западной Европе. – *Ред.*) методики прессиометрических испытаний и интерпретации их результатов определяются международным стандартом ISO 22476-4 (на момент публикации данной статьи – проектом, подготовленным техническим комитетом № 182 Международной организации по стандартизации ISO, точнее подкомитетом № 1 по геотехнике и техническим комитетом № 341 по геотехническим исследованиям и испытаниям Европейского комитета по стандартизации CEN). В указанном стандарте предусматривается более полный набор процедур. Он не ограничивается использованием прессиометра только в дисперсных грунтах, а включает и слабые скальные породы. Интересно отметить, что испытание прессиометром, помещаемым в предварительно пробуренную скважину, там называется «испытанием прессиометром Менара». На рисунке 8 показана схема соответствующего прибора.

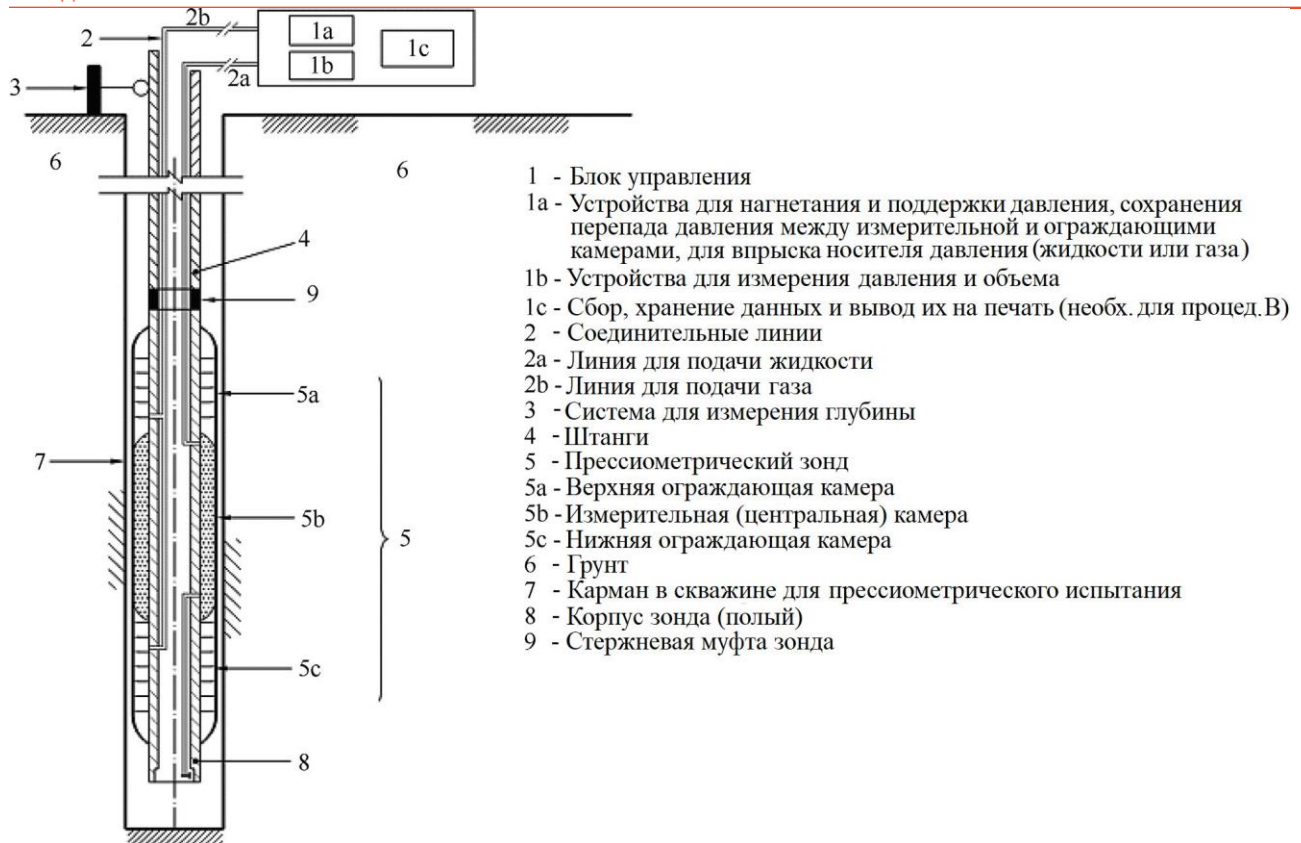


Рис. 8. Схема прессиометра Менара, помещаемого в предварительно пробуренную скважину (по ISO, 2009)

В стандарте ASTM описываются методики тестов, а также даются рекомендации по наилучшим практическим способам подготовки ствола скважины к прессиометрическим испытаниям в зависимости от типа грунта (таблица 3). В таблице 4 приведены рекомендации из стандарта ISO. Этот международный стандарт также определяет максимально допустимое время между формированием испытательного кармана и фактическим испытанием, а также максимально допустимую длину участка скважины, проходимого на этапе непрерывного бурения или забивки перед испытанием во избежание дальнейшего нарушения дисперсного или скального грунта (таблица 5).

Таблица 3. Рекомендации по выбору методов и инструментов подготовки скважины (по ASTM D4719)

Грунт	Тип	Вращательное (ротаторное) бурение с прямой подачей бурового раствора в забой	Вдавливаемый тонкостенный трубчатый грунтосос	Бурение пилотной скважины с последующим вдавливанием грунтососа	Бурение пилотной скважины и одновременное шнекование	Не прерывно перемещающийся шнек	Сухое бурение ручным шнеком	Бурение ручным шнеком с прямой подачей бурового раствора в забой	Забивной или виброзабивной грунтосос	Колонковое бурение	Ударно-вращательное бурение	Вдавливаемая, забивная или виброзабивная разрезная труба
Глинистый	текучий или текучепластичный	2А	2А	2	2	НР	НР	1	НР	НР	НР	НР
	от текучепластичного до полутвердого	1А	1	2	2	1А	1	1	НР	НР	НР	НР
	от полутвердого до твердого	1	2	1	1	1А	НП	НП	НП	1А	2А	НР
Пылеватый	выше УГВ	1А	2А	2	2А	1	1	2	2	НР	НР	НР
	ниже УГВ	1А	НР	НР	2А	НР	НР	1	НР	НР	НР	НР
Песчаный	рыхлый и выше УГВ	1А	НР	НР	2	2	2	1	2	НП	НР	НР
	рыхлый и ниже УГВ	1А	НР	НР	2	НР	НР	1	НР	НП	НР	НР
	от средней плотности до плотного	1А	НР	НР	2	1	1	1	2	НР	2А	НР
Гравелистый с песком или гравелистый песок ниже УГВ	рыхлый	2	НП	НП	НП	НП	НП	НП	НР	НП	2	2
	плотный	НР	НП	НП	НП	НР	НП	НП	НР	НП	2	1Б
Выветренный скальный		1	НП	2А	НП	1	НП	НП	1	2	2	НР

Обозначения: УГВ – уровень грунтовых вод; 1 – выбор этого метода в первую очередь; 2 – выбор во вторую очередь; НР – не рекомендуется; НП – неприменим; А – этот метод применим только при определенных условиях (подробности см. в тексте); Б – требуется предварительное бурение пилотной скважины.

Таблица 4. Рекомендации по методам введения в грунт прессиометрического зонда (по ISO, 2009)

Грунт	Размещение зонда без смещений грунта										Введение зонда в грунт прямой забивной разрезной трубой	
	1 < ДБ/ДЗ < 1,15											
	Вращательное (ротаторное) бурение				Ударно-вращательное бурение				Вдавливаемая, забивная или виброзабивная труба			
	ББО*	РШ/РШБ*	НПШ	КБ	УВ	УВБР	РТРИБР	ВТ	ЗТ	ВЗТ	ЗРТ	
Ил и текучая глина	Г°	Р°	-	°	-	°	-	°	РТWT	-	-	П°
Глинистый от текучепластичного до тугопластичного	Р°	Р°	Г°	Г°	-	П°	П°	П°	П	-	-	-
Глинистый полутвердый	Р°	Г°	Р	Р°	П°	Г°	Г°	-	П	-	-	-
Пылеватый	выше УГВ	Г°	Р°	Г°	-	П°	Г°	П°	П	П	-	-
	ниже УГВ	П°	Г°	-	П°	-	П°	Г°	-	-	-	-
Рыхлый песчаный	выше УГВ	Г°	Р°	Г	П	-	П°	П°	°	-	-	А°
	ниже УГВ	П°	Г°	-	°	-	П°	П°	°	-	-	А°
Песчаный от средней плотности до плотного	Р°	Р°	Р	П°	П	Г°	Г°	-	П	П	Г°	Г°
Гравий, крупная галька, булыжник	Г°	°	°	°	П	Р°	П°	-	П	П	Р°	Р°
Связный неоднородный дисперсный (например, валуны в глинах)	Г°	П°	П	Г°	П	Р°	П°	-	П	П	-	-
Рыхлый неоднородный дисперсный и другие грунты, не указанные выше (например, глинистые моренные, некоторые аллювиальные, с искусственно подобранным гранулометрическим составом, обработанные или необработанные на скважине)	Г°	П°	П	П°	П	Г°	Г°	-	П	П	Г°	Г°
Выветренный скальный, слабый скальный	Р°	Г°	Г	Г°	П°	Г°	Г°	-	П°	П°	-	-

Примечания

- Р – рекомендуется
- Г – годится (подходит)
- П – приемлемо
- – не годится (не подходит)
- – не подпадает под этот стандарт

- ББО – бурение без обсадки
- РШ – бурение без обсадки (ББО) ручным шнеком
- РШБ – бурение без обсадки (ББО) ручным шнеком с буровым раствором
- НПШ – непрерывно перемещающийся шнек
- КБ – колонковое бурение
- УВ – ударно-вращательное бурение
- УВБР – ударно-вращательное бурение с буровым раствором
- РТРИБР – разрезная труба с винтовым разрушающим инструментом и циркуляцией бурового раствора
- ВТ – вдавливаемая труба
- ТВт – тонкостенная вдавливаемая труба
- ЗТ – забивная труба
- ВЗТ – виброзабивная труба
- ЗРТ – забивная разрезная труба

ДБ – диаметр бурового инструмента

ДЗ – внешний диаметр зонда

° – в зависимости от фактических условий на площадке и оценки оператора

* – скорость вращения не должна превышать 60 об/мин, а диаметр бурового инструмента не должен быть более 1,15 внешнего диаметра зонда

° – циркуляция бурового раствора: давление не должно превышать 500 кПа, а расход (скорость потока) не должен превышать 15 л/мин. При необходимости подачи бурового раствора можно временно прервать.

+ – пилотная скважина с возможными методами предварительного бурения: забивной разрезной трубой (ЗРТ), ударно-вращательным способом (УВ) и ударно-вращательным способом с буровым раствором (УВБР)

Таблица 5. Максимально допустимая длина участка скважины, проходимого на этапе непрерывного бурения или забивки перед испытанием (по ISO, 2009)

Тип грунта	Максимальная длина участка скважины на стадии непрерывного бурения или забивки трубы перед испытанием, м		
	Адаптированное вращательное бурение**	Ударно-вращательное бурение**	Вдавливание, забивка или виброзабивка трубы***
Глинистый от текучего до текучепластичного; ил и глина от текучей до текучепластичной	1*	-	1*
Глинистый от мягкопластичного до тугопластичного	2	2	3
Глинистый от полутвердого до твердого	5	4	4
Пылеватый выше УГВ	4	3	3
Пылеватый ниже УГВ	2*	1*	-
Рыхлый песчаный выше УГВ	3	2	-
Рыхлый песчаный ниже УГВ	1*	1*	-
Песчаный средней плотности и плотный	5	5	4
Крупнозернистый несвязный: гравий, галька, булыжник	3	5	3
Крупнозернистый связный	4	5	3
Рыхлый неоднородный и другие грунты, не указанные выше (например, ледниковые моренные)	2	3	2
Выветренный скальный, слабый скальный	4	5	3

* Или требуемый интервал между двумя последовательными испытаниями.

** См. допустимые методы в таблице 3 в настоящей статье и таблицу С.2 в ISO, 2009.

*** Неприменимо к методике РТРИБР (с использованием разрезной трубы с внутренним разрушающим инструментом и циркуляцией бурового раствора) (см. таблицу 4 в настоящей статье и таблицу С.2.6.3 в ISO, 2009).

Спецификации ASTM изначально были разработаны с использованием французских стандартов в качестве шаблонов. Новый международный стандарт (ISO) включает вклад нескольких стран и пользователей с различным опытом, что делает этот документ более удобным и последовательным. А стандарт ASTM часто отстает в тех случаях, когда требуются обновления (например, каждые 7 лет), и пересматривается меньшим кругом пользователей. Применение же международного стандарта (ISO) в качестве рабочего документа для практики Северной Америки способствовало бы обмену информацией и результатами, которые могли бы быть использованы при разработке улучшенных методов помещения прессиометров в грунт, испытаний с их помощью и интерпретации получаемых данных.

Также следует указать на следующую разницу между стандартами ASTM D4719 и ISO 22476-4. В документе Международной организации по стандартизации (ISO) не упоминается об использовании петель циклов «разгрузка – повторное нагружение» как части прессиометрического испытания Менара, в то время как в стандарте ASTM указано, что такая петля приемлема и что результирующий модуль должен быть

четко идентифицирован как модуль цикла «разгрузка – повторное нагружение». Однако в документе ASTM мало инструкций относительно того, как следует выполнять такие циклы и интерпретировать их результаты. Так, на одной из лекций по испытаниям Менара было заявлено о категорическом неодобрении использования «модуля повторного нагружения» для испытаний прессиомером, помещаемым в предварительно пробуренную скважину, потому что этот параметр «не является стандартным модулем» и «не является точно определенным» (Briaud, 2013).

Однако возможность оценивать модуль по результатам измерений зависимости «напряжение – деформация» во время расширения испытательной полости и циклов «разгрузка – повторное нагружение» является одним из наиболее значительных преимуществ прессиометрических испытаний в дисперсных и скальных грунтах *in situ*. Как показано в таблице 6, модули, полученные в результате испытаний прессиомерами, расцениваются несколькими разными способами, что затрудняет достижение последовательного и уместного использования прессиометрических модулей при анализе деформаций. Было показано, что модуль цикла «разгрузка – повторное нагружение», по-видимому, относительно независим от метода размещения в грунте прессиометрического зонда, поскольку эти разгрузка и повторное нагружение, по существу, являются упругими. Однако петли «разгрузка – повторное нагружение» необходимо получать очень тщательно, чтобы гарантировать их надежную интерпретацию. Например, в литературе (Wroth, 1984) есть аргументированное мнение о том, что уменьшение (декремент) напряжения в петле «разгрузка – повторное нагружение» при прессиометрических испытаниях в недренированных условиях должно быть ограничено удвоенной прочностью на сдвиг. Для песков уменьшение (декремент) напряжения должно быть ограничено примерно 40% от исходного эффективного напряжения в начале разгрузки (Fahey, 1991). Кроме того, необходимо указать уровень приращения деформации, связанный с прессиометрическим модулем, поскольку этот модуль уменьшается с увеличением уровня приращения деформации (Clarke, 1995). При расширении в дренированных условиях также необходимо учитывать влияние уровня напряжения в начале разгрузки, поскольку с увеличением этого напряжения увеличивается жесткость.

Таблица 6. Варианты расценивания разными исследователями модулей, полученных по данным прессиометрических испытаний (по Clarke, 1995)

Обозначение	Название (определение)
G_i	Начальный секущий модуль сдвига
E_M	Модуль Менара
G_{1r}	Секущий модуль сдвига по циклу «разгрузка – повторное нагружение»
G_u	Секущий модуль сдвига по кривой разгрузки
G_r	Секущий модуль сдвига по кривой повторного нагружения
E_{1r}	Секущий модуль упругости по кривой разгрузки
E_{1r}^*	Секущий модуль упругости по кривой повторного нагружения
E_{1ro}	Максимальный модуль упругости по кривой разгрузки
E_{1ro}^*	Максимальный модуль упругости по кривой повторного нагружения
G_n	Секущий модуль сдвига, измеренный в диапазоне деформаций $n\%$
G_o	Максимальный модуль сдвига
G_z	Модуль эквивалентного элемента (эквивалентный модуль сдвига)
G_{1ro}	Эквивалентный модуль сдвига при эффективном напряжении <i>in situ</i>

В следующей части обзора, которая будет опубликована через неделю, речь вновь пойдет о проблемах, связанных с прессиометрическими испытаниями в Северной Америке, но на конкретных примерах.

Список литературы, использованной авторами переведенного обзора [1], можно посмотреть в конце оригинальной статьи по ссылке: soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR37-3_211-231.pdf.

Источник для перевода

1. Benoit J., Howie J.A. A View of Pressuremeter Testing in North America // Soils and Rocks (International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering). San Paulo, 2014. Vol. 37. № 3. P. 211–231. URL: soilsandrocks.com.br/soils-androcks/SR37-3_211-231.pdf.