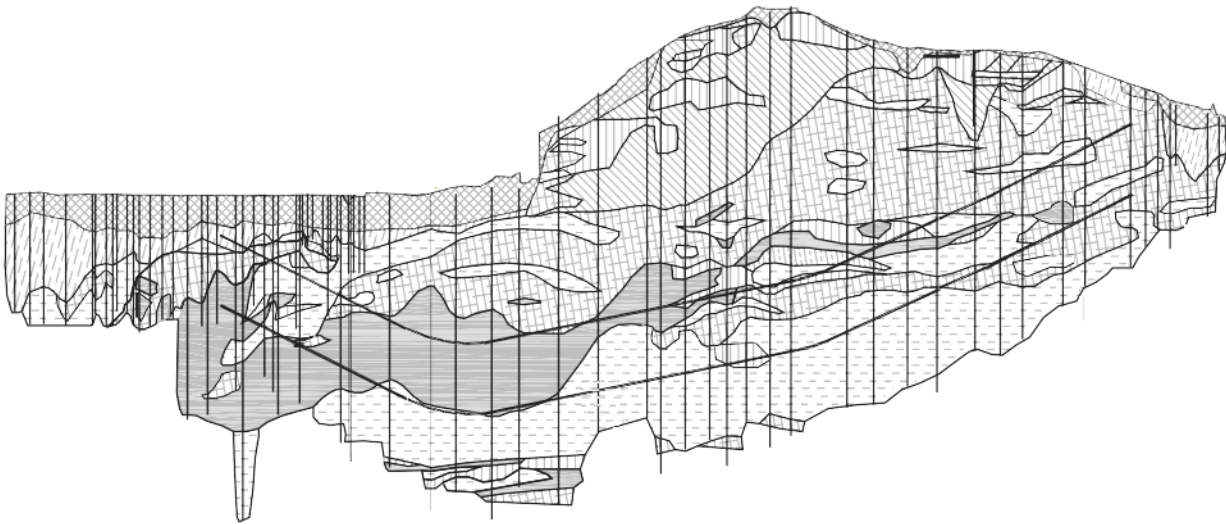


Об определении природного горизонтального напряжения в сиэтлской глине с помощью прессиометра. Часть 1



По инициативе и при поддержке ООО «Петромоделинг» редакция журнала «ГеоИнфо» продолжает знакомство читателей с методом прессиометрических испытаний грунтов. Данные испытания большинством изыскателей и проектировщиков воспринимаются как «более дешевая и простая альтернатива штамповых испытаний». На деле эта технология является уникальным методом испытаний грунтов в массиве. Она используется для определения как действующих горизонтальных напряжений и коэффициента горизонтального давления грунта в состоянии покоя 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 недренированная прочность.

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».

Предлагаем вниманию читателей обзор материалов статьи «Измерение горизонтального напряжения *in situ* в озерно-ледниковой сиэтлской глине с использованием прессиометра» [1], написанный Оливером Хупсом и Джоном Хьюзом. Эта работа была опубликована в 2014 году в «Журнале по геотехнике и геоэкологической инженерии» (*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*), издаваемом Американским обществом инженеров-строителей (ASCE).

Для разработки проекта тоннеля на внутриштатной автодороге «Стэйт рут 99» (State Route 99, SR 99), сооружаемого щитовым способом в городе Сиэтл (шт. Вашингтон, США), были проведены прессиометрические испытания с целью оценки поведения грунта «напряжение – деформация» в условиях естественного залегания вдоль трассы сооружения. Многие из этих испытаний были проведены в озерно-ледниковой глине, от твердой до очень твердой, называемой сиэтлской глиной. Эта геологическая формация исторически известна глубокими обрушениями склонов, многие из которых были связаны с высвобождением высоких горизонтальных внутренних напряжений. Программа изысканий как раз и была сфокусирована на

оценке горизонтальных напряжений *in situ* вдоль трассы указанного тоннеля. Из-за очень твердой консистенции сиэтлской глины и возможности встречи с булыжниками и крупной галькой было невозможно выполнить испытания ни самозабуривающимся прессиометром, ни дилатометром. Поэтому выполнялись испытания прессиометром, помещаемым в предварительно пробуренную скважину. Оценки, полученные с использованием нескольких методов определения горизонтального напряжения, в том числе нового подхода с полевыми испытаниями на ползучесть, показали, что горизонтальные напряжения *in situ* в сиэтлской глине значительно выше, чем можно было бы ожидать, приняв простую, ограниченную в горизонтальном направлении вертикальную траекторию напряжений при нагружении и разгрузке из-за оледенения. Деформационные особенности, обычно наблюдающиеся для сиэтлской глины *in situ*, указывают на то, что история ее нагружения включала также значительный горизонтальный сдвиг. Память об этом сдвиге в структуре глины может влиять на ее напряженное состояние *in situ* и на ее реакцию на снятие горизонтальной нагрузки.

Сегодня рассмотрим вводную часть статьи [1] и грунтовые условия на исследованной в этой работе территории.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ГЕОИНФО

info@geoinfo.ru

БЕРШОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Генеральный директор Группы компаний «Петромоделинг»

alexey.bershov@petromodeling.com

ООО "ПЕТРОМОДЕЛИНГ"

Генеральный спонсор «ГеоИнфо»

info@petromodeling.com

Введение

В своей статье «Измерение горизонтального напряжения *in situ* в озерно-ледниковой сиэтлской глине с использованием прессиометра» [1] Оливер Хупс и Джон Хьюз рассматривают часть результатов обширной программы геотехнических изысканий, выполненных для строительства тоннеля на внутриштатной автомагистрали «Стэйт рут 99» (State Route 99, SR 99) под деловым центром города Сиэтл в штате Вашингтон США (рис. 1). Проектировался ориентированный с севера на юг тоннель длиной примерно 2,6 км на глубине примерно 30–85 м от поверхности земли. При диаметре 17,7 м он должен был стать (в период написания статьи [1]) самым большим из тоннелей мира, пройденных щитовым способом в дисперсном грунте.

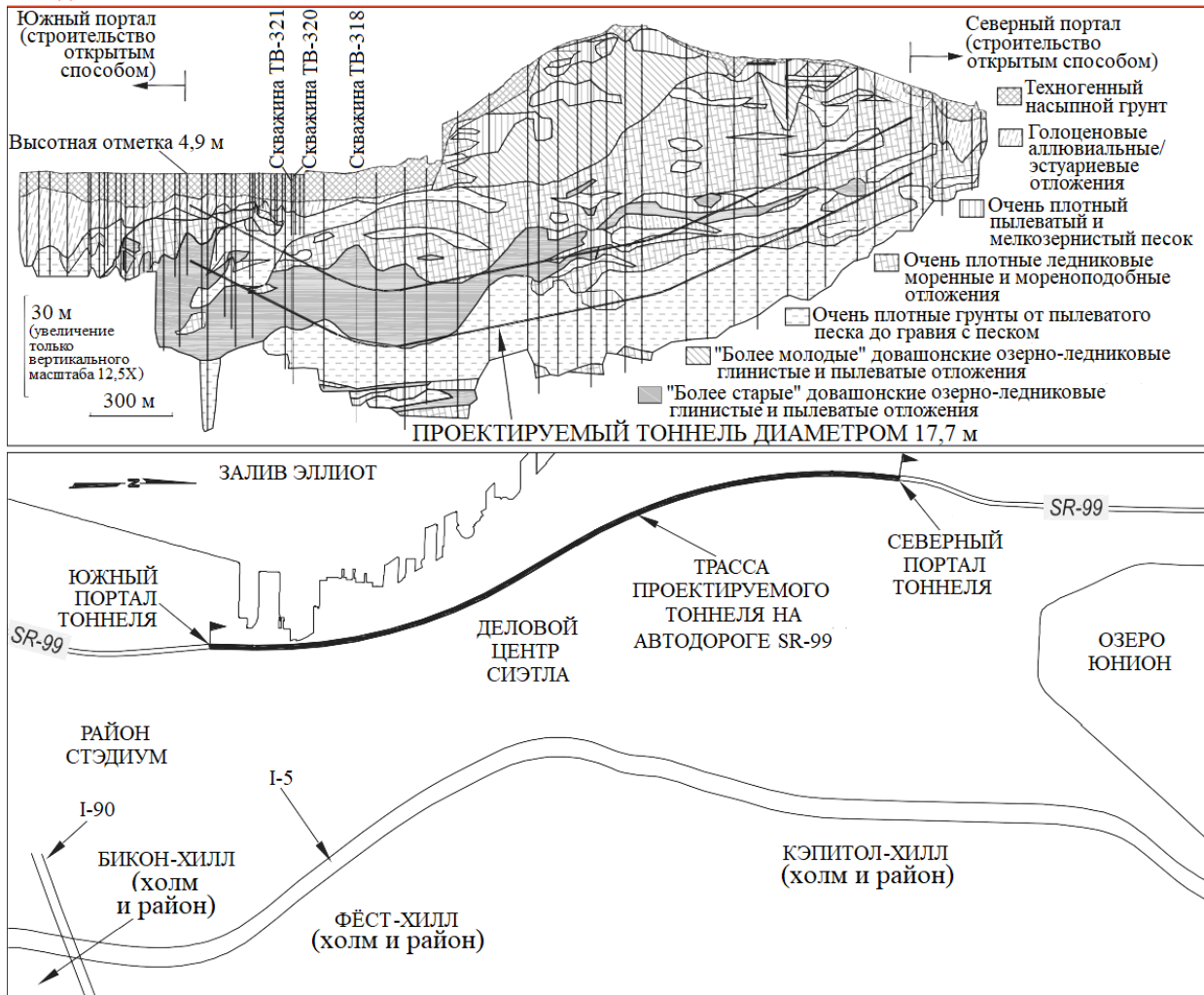


Рис. 1. Упрощенный геологический разрез и план района трассы тоннеля на автомагистрали SR 99 под деловым центром Сиэтла (по [1])

Авторы статьи [1] уточняют, что программа изысканий включала более 120 прессиометрических испытаний вдоль трассы тоннеля (выполненных силами компании In Situ Engineering из города Снохомиш штата Вашингтон США), которые использовались для оценки поведения грунта «напряжение – деформация» в условиях естественного залегания (*in situ*). Многие из данных испытаний были проведены в озерно-ледниковой глине от твердой до очень твердой, известной как сиэтлская глина. Эти отложения характеризуются частыми глубокими обрушениями подрезанных склонов и бортов выработок, многие из которых были связаны с высвобождением высоких горизонтальных внутренних напряжений. На ранней стадии выполнения программы исследований результаты визуального просмотра прессиометрических данных указали на признаки высокого горизонтального напряжения в грунте *in situ*. В ходе последних 10 испытаний в сиэтлской глине горизонтальные напряжения рассматривались более детально, на чем и сфокусирована статья Хупса и Хьюза [1].

В центре внимания программы прессиометрических испытаний были природные горизонтальные напряжения σ_{ho} , поскольку они влияют на расчеты компенсации давления грунта давлением торца проходческого щита и на расчеты обделки тоннеля, а также используются в конечноэлементном моделировании для оценки осадок. Из-за очень твердой консистенции сиэтлской глины и возможности встречи с булыжниками и крупной галькой было нереально выполнить испытания ни самозабуривающимся прессиометром, ни

дилатометром. Поэтому выполнялись испытания прессиометром, помещаемым в предварительно пробуренную скважину. Из-за того что большинство опубликованных методик оценки σ_{h0} включают исследование начального участка прессиометрической кривой «напряжение – деформация» и поскольку эта часть кривой больше всего подвержена влиянию нарушений грунта, связанных с предварительным бурением, оценка σ_{h0} в сиэтлской глине *in situ* была особенно сложной.

Авторы работы [1] оценивали значения σ_{h0} *in situ* главным образом с использованием подбора (fitting) комплексной геомеханической (конститутивной) модели грунта для коррекции прессиометрических данных, а также с помощью новой экспериментальной методики, основанной на итеративных прессиометрических испытаниях на ползучесть (creep tests). В обоих этих методах Хупс и Хьюз [1] использовали части прессиометрических кривых «напряжение – деформация» после предела текучести и во время разгрузки. Из-за более высоких напряжений на этих стадиях испытания кольцевая зона напряженного грунта больше, чем в начале выполнения теста. Поэтому считается, что бо́льший процент реакции грунта исходит от неповрежденной глины за пределами кольцевой зоны, наиболее нарушенной при предварительном бурении. Таким образом, как логично считают авторы статьи [1], нарушение грунта у ствола скважины на результаты использования этих методов влияет меньше, чем на итоги применения других методов, которые основаны на данных начальных стадий испытаний.

Представленные в статье [1] горизонтальные напряжения *in situ*, полученные с помощью прессиометра, сравнивались с результатами предыдущих исследований в сиэтлской глине и с напряжениями, оцененными с использованием взаимосвязей между коэффициентом переуплотнения OCR и коэффициентом горизонтального давления грунта в состоянии покоя K_0 , который предполагает, что глина подверглась одномерным вертикальным нагружению и разгрузке, ограниченным в горизонтальном направлении (так называемым простым нагружением и разгрузке). Выполненные Хупсом и Хьюзом [1] оценки показали, что природные горизонтальные напряжения в сиэтлской глине были значительно более высокими, чем можно было бы ожидать, приняв простую траекторию напряжений при нагружении и разгрузке из-за наступания и отступания ледника соответственно. Здесь авторы работы [1] дают следующее пояснение. Деформационные особенности, обычно наблюдающиеся для сиэтлской глины в естественных условиях, указывают на то, что история ее нагружения включала также значительный горизонтальный сдвиг. Память об этом сдвиге в структуре глины может влиять на ее напряженное состояние *in situ* и на ее реакцию на снятие горизонтальной нагрузки.

О грунтовых условиях в деловом центре Сиэтла

Хупс и Хьюз [1] указывают, что геологический разрез вдоль трассы той части тоннеля SR-99, которая по проекту должна была проходиться щитовым способом, довольно изменчив (см. рис. 1) и в основном представлен грунтом, который имеет сложную историю нагружения под действием по крайней мере шести оледенений. Далее авторы статьи [1] кратко рассматривают эту историю, ссылаясь на других исследователей.

Во время самого последнего оледенения, идентифицированного для рассматриваемой территории как стадиял (подстадия) Вашона оледенения Фрейзера (приблизительно 14 000–17 000 лет назад), ледниковый язык Пьюджет Кордильерского ледяного щита, по оценкам, имел в районе Сиэтла толщину около 900 м. Во время этого вашонского оледенения перед ледниковым языком Пьюджет накопились отложения прогляциального вымыва, названные «заполнением Великой низменности» (Great Lowland Fill, GLF), до высотной отметки на территории Сиэтла примерно 140 м. Эти грунты до сих пор присутствуют на многих холмах

рядом с заливом Пьюджет-Саунд (они идентифицированы там как «песок Эсперанса», или «фронтальные водно-ледниковые отложения Вашона»).

Но большая часть грунтов GLF была разрушена за счет эрозии талой подледниковой водой под высоким давлением, которое, по оценкам, было примерно равно общему давлению ледника под большей частью его языка, что привело к низкому увеличению общего эффективного нормального напряжения под большей частью ледяного щита во время ледникового периода. Однако оцененное среднее увеличение общего эффективного нормального напряжения под действием ледяной толщи на южном краю ледникового языка составило примерно 1 МПа (рис. 2), но местами это напряжение могло быть больше до трех раз из-за эпизодических сезонных дренирований. Максимальное в прошлом вертикальное эффективное напряжение σ'_{vY} в глубоко залегающей озерно-ледниковой глине вдоль трассы проектируемого тоннеля, определенное с использованием результатов испытаний на одноосное сжатие, вероятно, было частично вызвано этим общим напряжением от действия ледника, но все же в основном оно возникло в результате добавочной нагрузки от вышеупомянутой толщи GLF толщиной около 140 м. Эти две нагрузки, вероятно, одновременно действовали на глубоко залегавшую глину во время отступления ледника Вашона.

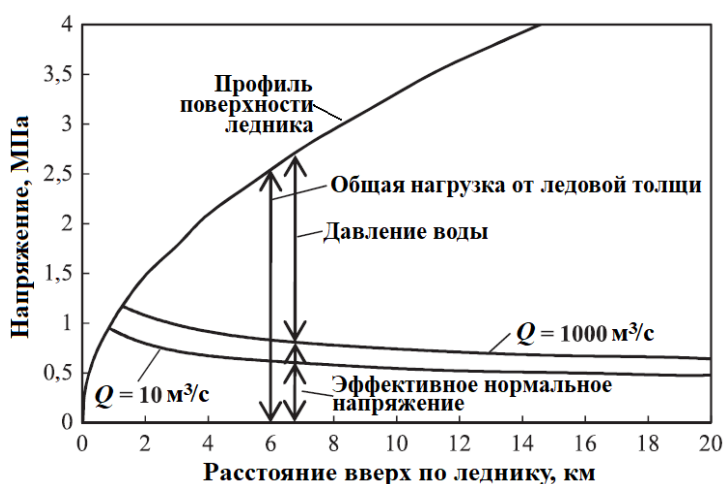


Рис. 2. Оцененные общие и эффективные нормальные напряжения под ледниковым языком Пьюджет Кордильерского ледяного щита для различных расходов подледниковой талой воды Q (по [1])

Основной интерес для Хупса и Хьюза [1] представляла довашонская (четвертичная) озерно-ледниковая глина (Q_{pgl}). Она очень похожа на более молодую и более известную вашонскую озерно-ледниковую глину Лотона (Q_{vgl}), за исключением того, что она подверглась воздействию более чем одного оледенения. Ее можно отличить от лотонской глины по стратиграфическому расположению ниже группы палеочув, известных как слои Олимпии.

В статье [1] термин «сиэтлская глина» используется для всех озерно-ледниковых глин на территории Большого Сиэтла. Эти грунты являются результатом отложения взвешенных осадков в прогляциальных (расположенных перед ледником) озерах в пределах низменности Пьюджет-Саунд. На территории вдоль трассы рассматриваемого тоннеля они испытывали нагрузку от ледяных толщ в течение по крайней мере двух наступаний ледника и от отложений прогляциального вымыва, накопившихся перед ледниковым языком Пьюджет (GLF), в течение стадиала Вашона. Данные грунты состоят в основном из пылеватой глины от твердой до очень твердой и из глинистого алеврита с отдельными слоями и прослоями алеврита и мелкозернистого пылеватого (алевритистого) песка. Эти

отложения включают как низко-, так и высокопластичные глины и варьируют по текстуре от слоистых до массивных.

Довашонская (четвертичная) озерно-ледниковая глина (Qpgl) обычно покрыта слоем очень плотных моренных отложений (Qpgt) вдоль всей трассы тоннеля SR-99 (см. рис. 1) и, как правило, подстилается плотными или очень плотными песчано-гравийными отложениями ледникового выноса (водно-ледниковыми).

В таблицах 1 и 2 приведены представленные авторами работы [1] показатели свойств грунтов, полученные по данным испытаний для строительства тоннеля SR-99 и тоннеля для легкорельсового городского транспорта в районе Бикон-Хилл (см. рис. 1). А в таблице 3 показаны результаты 10 прессиометрических испытаний *in situ*, использованные в исследовании Хупса и Хьюза [1].

Таблица 1. Результаты оценки числа пластичности и показателя текучести довашонской озерно-ледниковой глины (Qpgl) на основе материалов по проектам тоннеля SR-99 и тоннеля для легкорельсового городского транспорта в районе Бикон-Хилл (по [1])

Параметр, %	Среднее значение, %	Среднеквадратич. отклонение, %	Количество точек данных
Число пластичности PI	56	15	868
Показатель текучести LL	31	16	868

Таблица 2. Параметры прочности довашонской озерно-ледниковой глины (Qpgl) на основе материалов по проекту тоннеля для легкорельсового городского транспорта в районе Бикон-Хилл (по [1])

Состояние образца	Количество точек данных	Эффективный угол внутр. трения ϕ' , град.	Эффективное удельн. сцепление c' , кПа
Относительно ненарушенное	63	29	57
С прерывистыми плоскостями скольжения	10	22	26
С плоскостями скольжения	6	16	0

Примечание: параметры прочности по Мору – Кулону ϕ' и c' , полученные в результате трехосных испытаний в условиях недренированного изотропного сжатия.

Таблица 3. Сводные данные прессиометрических испытаний (по [1])

№ теста	Скважина	Глубина, м	PI*, %	$\sigma_{\text{гн}}$, кПа	OCR**	Структура образца глины	Диапазон K_0 , оцененный методом				Количество пробных давлений в камере при поиске равновесного давления
							Mayne, Kulhawy, 1982	Brooker, Ireland, 1965	Анализ путем модельного испытания	Испытания на основе нового подхода с поиском равновесного давления	
119	ТВ-318	28,6	36	287	5–15	деформированная	1,1–1,9	1,2–1,7	1,5	1,7–2,1	2
118	ТВ-318	29,0	36	291	5–15	деформированная	1,1–1,9	1,2–1,7	2,8	2,8–2,9	3
129	ТВ-318	37,7	27	401	4–11	деформированная	1,0–1,6	1,0–1,7	1,9	2,0–2,2	3
128	ТВ-318	38,2	27	406	4–11	ненарушенная	1,0–1,6	1,0–1,7	2,2	2,3–2,6	3
130	ТВ-318	41,2	51	442	4–10	ненарушенная	1,0–1,6	1,3–1,5	1,8	1,8–1,9	3
137	ТВ-321	43,5	32	422	4–10	ненарушенная	1,0–1,6	1,0–1,6	1,2	1,2	5
136	ТВ-321	44,0	32	427	4–10	ненарушенная	1,0–1,6	1,0–1,6	1,3	1,1	5
132	ТВ-320	44,3	50	473	4–9	деформированная	1,0–1,5	1,3–1,5	1,8	1,8–1,9	3
139	ТВ-321	46,9	42	453	4–10	ненарушенная	1,0–1,6	1,2–1,6	0,9	0,8–0,9	3
138	ТВ-321	47,3	42	457	4–10	ненарушенная	1,0–1,6	1,2–1,6	0,9	0,9	3

*На основе образцов грунта из зон, расположенных непосредственно над и/или под зоной прессиометрического испытания.

** Оцененный диапазон коэффициента переуплотнения OCR.

Авторы работы [1] указывают, что сиэтлские глины типичны для многих сильно переуплотненных глин по всему миру и обычно содержат отдельные плоскости скольжения и волосяные (очень тонкие) трещины. Многие исследователи, на которых ссылаются авторы статьи [1], пришли к выводу, что это результат приложения и снятия огромных нагрузок, связанных с наступанием и отступанием ледников. Однако, как было задокументировано еще до исследования Хупса и Хьюза [1], многие отложения Qpgl и некоторые грунты Qvgl содержат зоны интенсивных сдвигов (с малым углом), глыбистости и с плоскостями скольжения, сильно варьирующими по вертикали и по горизонтали (примерно от 1 до 10 м и более). Эти деформированные зоны были обнаружены у поверхности земли, а также иногда (при проходке тоннеля SR-99) на глубине более 43 м. Типичный пример таких деформаций был встречен на участке длиной примерно 11 км к северо-востоку от трассы тоннеля (рис. 3).

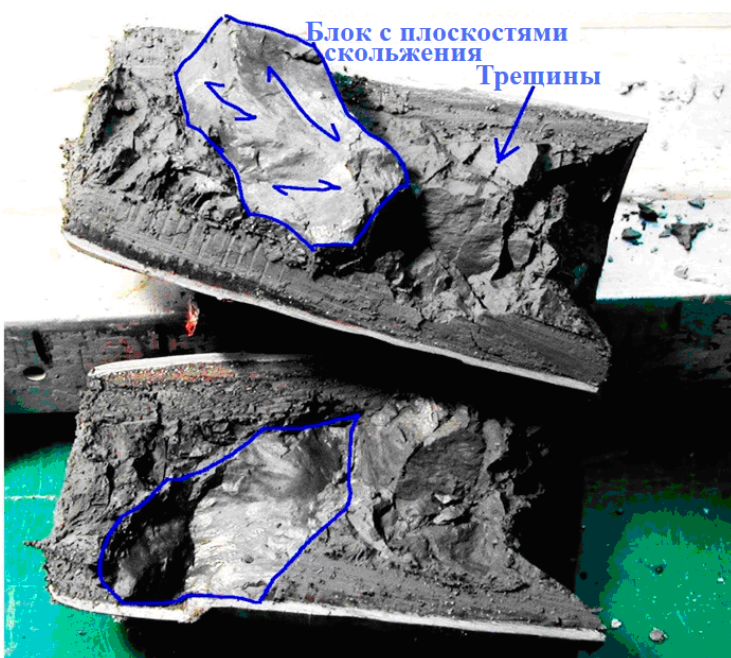


Рис. 3. Сильно деформированный образец отложений Qpgl, извлеченный из буровой скважины вблизи автомагистралей SR-520 и «Белвью Вей» с глубины 6,4 м с помощью трубчатого грунтоноса диаметром 7,6 см (по [1])

Как предполагают авторы работы [1] на основе анализа материалов изысканий для строительства тоннеля SR-99 и для ряда других инфраструктурных проектов в районе Большого Сиэтла, такие деформированные зоны в целом широко распространены в отложениях Qpgl. Интенсивность деформаций в них (см. рис. 3) кажется слишком большой для вызванной только одномерной разгрузкой. Однако пространственная изменчивость и явно прерывистый характер этих зон не подтверждают гипотезу древнего оползня.

Хотя встречающиеся в публикациях гипотезы о том, что какие-то из этих деформированных зон могут быть связаны с Сиэтлским разломом, и могут быть верными для некоторых случаев, но, как отмечают Хупс и Хьюз [1] многие из мест выполнения вышеупомянутых изысканий располагались в нескольких (и более) километрах к северу от разломов, оперяющих это крупное разрывное нарушение.

Другим объяснением возникновения указанных зон деформаций, по предположению авторов статьи [1], может быть пассивный сдвиг в сиэтлской глине под действием наступавшего ледника и накапливавшейся на ней морены. Возможно, под южной границей продвигавшегося на юг ледникового языка образовывались фронты глубоких пассивных сдвигающих напряжений, которые передавались через залегающую ниже глину. Сочетание высоких градиентов давления подледниковой воды (см. рис. 2), большой изменчивости слоистого геологического разреза (см. рис. 1) и неровного рельефа поверхности земли могло привести к локальным (а не однородно- или широкораспространенным) пассивным нарушениям в пределах глинистых и алевритовых отложений.

Приведенный Хупсом и Хьюзом [1] пример истории нагружения отложений Qpgl представлен на концептуальном уровне на рисунке 4.

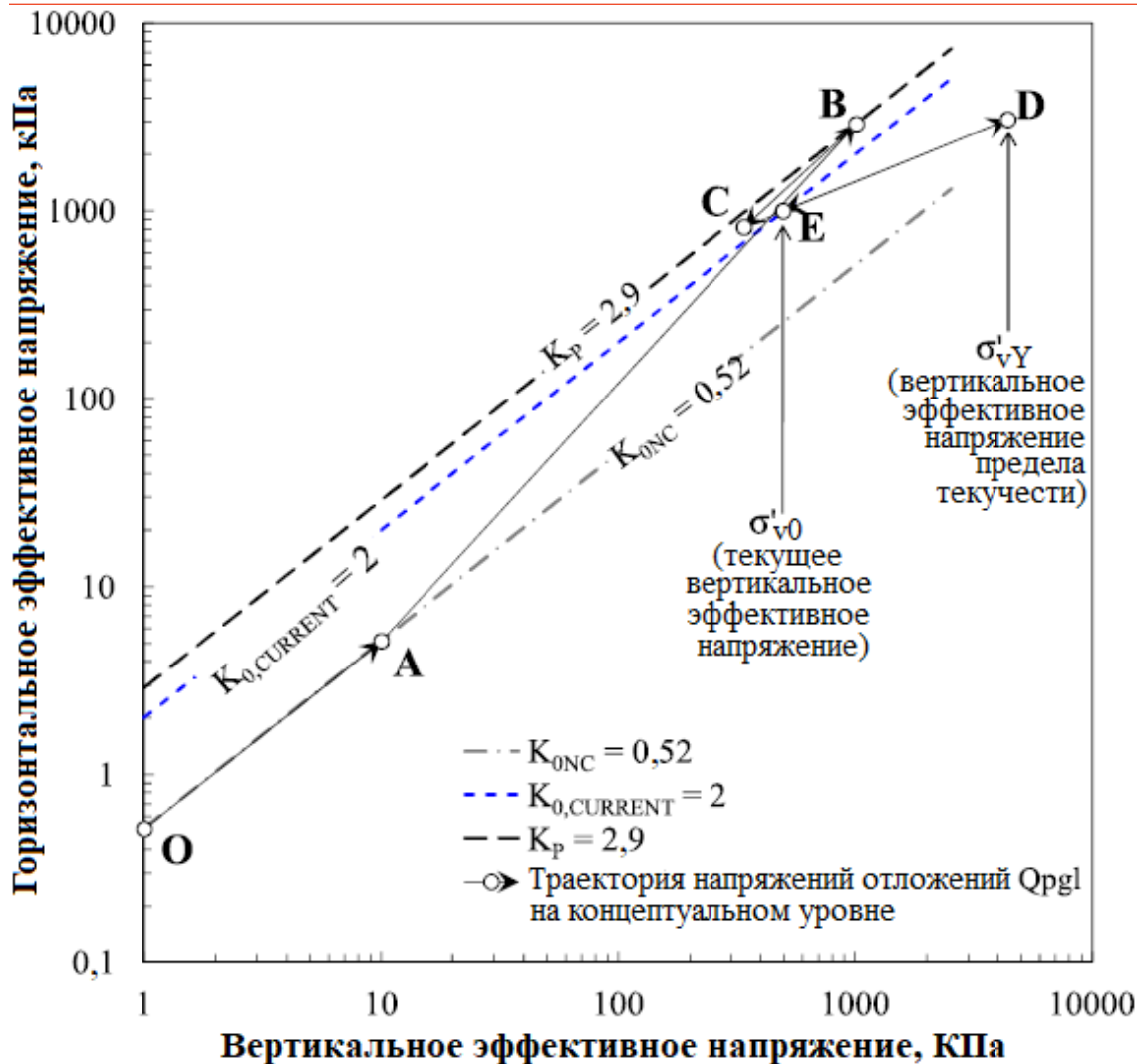


Рис. 4. История нагружения отложений Qpgl на глубине около 29 м в районе скважин ТБ-318, ТБ-320 и ТБ-321 на концептуальном уровне (принимается, что эти отложения подвергались воздействию двух оледенений).
 Буквенные обозначения: $K_0 = \sigma'_{h0}/\sigma'_{v0}$ – коэффициент горизонтального давления грунта в состоянии покоя; $K_{0,ONC}$ – значение K_0 при одномерном первичном сжатии (при коэффициенте переуплотнения OCR = 1); $K_{0,CURRENT}$ – текущее значение K_0 ; K_p – коэффициент горизонтального давления грунта в пассивном состоянии (по [1])

Авторы статьи [1] кратко описывают показанное на рисунке 4 следующим образом:

- от точки О до точки А: накопление осадков на дне прогляциального озера во время довашонского оледенения (Qpgl);
- от А до В: довашонское наступание ледникового языка Пьюджет, вызвавшее подледниковые пассивные сдвиговые деформации и образование перекрывающих отложений Qpgt (принимается, что точка В соответствует увеличению общего эффективного вертикального напряжения на 1 МПа (из рис. 2));
- от В до С: простая разгрузка после окончания довашонского оледенения (принимается, что поверхность грунта на тот момент соответствовала нынешнему контакту между довашонскими и вышележащими отложениями без учета возможной эрозии);
- от С до D: накопление осадков на дне прогляциального озера во время вашонского оледенения, в результате чего сначала сформировалась толща вашонской озерно-ледниковой глины Qvgl, затем она была перекрыта отложениями

прогляциального вымыва, накопившимися перед ледниковым языком Пьюджет (GLF), а потом уже сверху лег вашонский ледниковый язык Пьюджет (принимается, что произошло только простое нагружение, то есть отложения Q_{pgl} не испытывали увеличения напряжений пассивного сдвига при наступании языка Пьюджет за счет наличия толщи GLF мощностью до 140 м в качестве «подушки» между ледником и глиной);

- от D до E: простая разгрузка из-за эрозии отложений GLF и отступления вашонского ледникового языка Пьюджет.

При этом на рисунке 4 для простоты принимается, что было только одно довашонское оледенение (то есть показаны только два оледенения: одно довашонское между точками O и B и одно вашонское между точками C и D), хотя в статье [1] считается, что отложения Q_{pgl} подвергались как минимум двум, а возможно и пяти, довашонским оледенениям. Поскольку эффективное горизонтальное напряжение *in situ* не может превышать предел пассивного напряженного состояния, линия K_p (где K_p – коэффициент горизонтального давления грунта в пассивном состоянии) на рисунке 4 установила бы верхнюю границу, в результате чего траектория напряжений между дополнительными довашонскими ледниковыми нагрузками, вероятно, циклически повторялась бы между напряженными состояниями, подобными таковым в точках B, C, D и E, вместо того чтобы увеличиваться с каждым оледенением.

Как показал местный опыт, обрушение бортов выработок в сиэтлской глине является обычным явлением. На основе обзора работ других исследователей и материалов геотехнических изысканий для нескольких крупных инфраструктурных проектов на исследуемой территории авторы статьи [1] указывают, что испытания исследуемых грунтов на сдвиг в кольцевой обойме при больших деформациях (large-strain ring-shear testing) и обратный анализ оползней в сиэтлской глине обычно дают эффективные остаточные углы внутреннего трения величиной 13–18 град. Для этих отложений характерны высокие внутренние горизонтальные напряжения *in situ*.

Ссылаясь на мнения некоторых других авторов, Хупс и Хьюз [1] предполагают, что высокие горизонтальные давления в естественных условиях будут стремиться удерживать трещины внутри массива закрытыми, но эти разрывы сплошности начнут открываться при снятии горизонтальных напряжений (например, при врезке в склон). В сочетании с периодами обильных продолжительных дождей и хорошо известной тенденцией, согласно которой давление поровой воды в очень жестких глинах изначально является отрицательным при приложении напряжений сдвига (то есть эти грунты имеют тенденцию к расширению), раскрытие трещин в них может способствовать инфильтрации воды и вызывать снижение прочности *in situ* от очень высокой недренированной до полностью ослабленной и в конечном итоге остаточной.

Далее авторы работы [1] приводят следующие выводы других исследователей. Условия с высоким значением K_0 приводят к тому, что максимальные напряжения сдвига *in situ* значительно выше в местах врезки в грунт. Это может значительно снизить прочность на сдвиг и привести к прогрессирующему разрушению. В случае строительства автомагистрали I-5 вдоль холмов Бикон, Фёст и Кэпитол в Сиэтле (см. рис. 1) считалось, что глубокие обрушения склонов, которые произошли вскоре после земляных работ на них, не зависели от условий, связанных с дождевыми или грунтовыми водами, и объяснялись только высвобождением горизонтальных напряжений.

В следующей части обзора, которая будет опубликована в ближайшее время, речь пойдет о процедурах прессиометрических испытаний и методах оценки их результатов.

Список литературы, использованной авторами рассматриваемой работы [1],
можно посмотреть в конце оригинальной статьи по адресу: tarjomefa.com/wp-content/uploads/2017/10/7940-English-TarjomeFa.pdf.

Источник

1. Hoopes O., Hughes J. In situ lateral stress measurement in glaciolacustrine Seattle clay using the pressuremeter // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2014. V. 140. P. 04013054-1 – 04013054-11. URL: tarjomefa.com/wp-content/uploads/2017/10/7940-English-TarjomeFa.pdf.