

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ОТБОР ПРОБ МЕРЗЛОГО ГРУНТА С ПОМОЩЬЮ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ CONE PENETRATION TESTING AND SAMPLING OF FROZEN SOILS

© 2021 г. Д.В. Лагоша¹, Н.Г. Волков², И.С. Соколов³

© 2021 Daniil V. Lagosha¹, Nikolay G. Volkov², Ivan S. Sokolov³

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» (группа компаний Фугро),
пр. Вернадского, д. 29, офис 1104, г. Москва, 119331, Россия
«GEOINGSERVICE» LLP (Fugro Group),
Bld. 29, Office 1104, Vernadskogo Ave, 119331, Moscow, Russia
dvl@fugro.ru¹, ngv@fugro.ru², ssi@fugro.ru³

Аннотация: В статье анализируются результаты полевых и лабораторных испытаний многолетнемерзлого грунта. Ненарушенные образцы многолетнемерзлых грунтов были отобраны при помощи оборудования для статического зондирования и пробоотборника MOSTAP. Технология пробоотбора, использующая оборудование для статического зондирования, применялась на многолетнемерзлых грунтах впервые. На полученных образцах был выполнен полный комплекс определений физических свойств. По результатам испытаний выделены и подтверждены несколько инженерно-геологических элементов (ИГЭ), один из которых представлен суглинком от пылеватого до песчанистого, легким, пластичномерзлым, слабодистым, незасоленным. Также проведено сравнение результатов статистической обработки. Приведены данные по коэффициенту вариации значений предельно-длительного удельного сопротивления грунтов под конусом зонда (характеристика длительной прочности) для выделенного мерзлого ИГЭ.

Abstract: The article provides the analysis of the results of the permafrost soils field and laboratory tests. The undisturbed permafrost samples were collected using cone penetration testing (CPT) equipment and MOSTAP sampler. The sampling technology using CPT equipment was applied on permafrost soils for the first time. The full scope of tests for physical properties were carried out on the collected samples. Based on the test results, several engineering-geological elements (EGE) were identified and confirmed, one of which is composed of frozen silty clay. The results of statistical data processing were compared. The data on the coefficient of variation of the values of the ultimate long-term resistivity of soils against cone penetration (characteristic of long-term strength) for the frozen EGE are presented.

Ключевые слова: статическое зондирование; многолетнемерзлые грунты; предельно-длительная прочность мерзлого грунта; льдистость грунта; криолитозона; реологические свойства грунтов.

Key words: cone penetration testing; permafrost soils; ultimate long-term strength of frozen soil; ice content of the soil; permafrost; rheological properties of soils.

Введение

Роль статического зондирования достаточно велика в современных инженерно-геологических и геотехнических исследованиях, особенно для проектирования свайных фундаментов. В области зондирования на сегодня сосредоточены самые передовые технологии как в технике, так и в программном обеспечении. Кроме того, оно является относительно недорогим по сравнению с другими полевыми методами

испытания грунтов. Применение статического зондирования на многолетнемерзлых грунтах не распространено широко в виду малого опыта как выполнения самого зондирования в таких условиях, так и последующей интерпретации полученных результатов [9, 10, 14, 15]. В случае мерзлых грунтов рекомендуется применение статического зондирования параллельно с бурением скважин для подтверждения литологического состава исследуемых грунтов массива, а также в сочетании со штамповыми и

прессиометрическими испытаниями, в случае определения деформационных показателей. В методической литературе рекомендуется сочетать различные методы для уменьшения неоднозначности при интерпретации результатов работ и повышения их достоверности.

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов комплекс полевых методов, включая бурение и полевые испытания, применяется достаточно редко из-за удаленности площадок исследования и высокой стоимости мобилизации оборудования. Также это затруднительно сделать на застроенных территориях, например, в подвалах зданий, проветриваемом подполье и т.д. В связи с этим возможность использования оборудования для статического зондирования с целью отбора проб мерзлых грунтов является актуальной и перспективной. Важно отметить, что публикаций в мировой литературе об опыте использования такого оборудования для мерзлых грунтов нет.

На площадке исследований в г. Новый Уренгой были проведены испытания грунтового основания с помощью статического зондирования, которые включали скоростные испытания, испытания со «стабилизацией» и отбор ненарушенных проб, в том числе мерзлого грунта. В итоге было обосновано выделение инженерно-геологического элемента (ИГЭ), представленного мерзлым суглинком. В статье приводится статистическая обработка значений показателей физико-механических и физических свойств указанного грунта,

полученных различными методами, анализируются и сравниваются ее результаты для выделенного ИГЭ.

Проведение полевых испытаний

Район исследований расположен в южной жилой части г. Новый Уренгой на высоте 44 метров над уровнем моря. В настоящий момент район представляет собой застроенную равнинную территорию четвертой надпойменной террасы, находящуюся между реками Ева-Яха на юге и Томчару-Яха (приток Седэ-Яхи) на севере. Геокриологические условия характеризуются наличием талых и многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в сложном соотношении как в плане, так и по глубине (островное развитие ММГ).

Площадка исследований находится в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов и расположена в подвальных помещениях жилых зданий высотой менее 2 м с многочисленными коммуникациями в виде канализационных и отопительных труб, усложняющими проведение испытаний. Работы проводились только в замкнутом пространстве, условия на объекте не позволяли использовать установку на базе тяжелого автомобиля (буровую или для статического зондирования) или другие часто применяемые полевые методы с использованием крупногабаритного оборудования.

Проведение испытаний статическим зондированием

Для выполнения статического зондирования с измерением электропроводности, температуры и порового давления RTCPTu использовалась



Рис.1. а и б - Переносная установка статического зондирования.

специализированная малогабаритная установка для проведения испытаний в труднодоступных местах с гидравлическим силовым агрегатом с номинальным усилием вдавливания 150 кН. Фотография установки статического зондирования ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» представлена на рисунке 1.

Испытания мерзлых грунтов статическим зондированием были выполнены на строительной площадке с учетом накопленного опыта предыдущих исследований [1, 2, 3, 9, 10, 16, 17].

Статическое зондирование проводилось в соответствии с ГОСТ 19912-2012 [4] и методикой Фугро [1, 2, 11] двумя способами: непрерывное и прерывистое («со стабилизацией») погружение зонда.

Различие в подходах при выполнении статического зондирования иллюстрируется рисунком 2, на котором указаны параметры, считываемые при статическом зондировании в одном и другом случае. В отечественных нормативных документах регламентированы две методики: непрерывное статическое зондирование и прерывистое [4].

Непрерывное («скоростное») статическое зондирование – это задавливание зонда в грунт с постоянной скоростью, когда перерывы в погружении зонда допускаются только для наращивания штанг зонда. В результате его выполнения можно получить следующие параметры: «скоростное» удельное сопротивление грунта под конусом зонда (q_{cv} , МПа), «скоростное» удельное сопротивление грунта на муфте трения зонда (f_{sv} , МПа), поровое давление (u_2 , МПа), температура грунта (T , °C) и его электропроводность (R , См/м).

Прерывистое статическое зондирование (режим «со стабилизацией» зонда) выполняют путем вдавливания зонда с постоянной скоростью, когда в процессе периодических остановок на заданной глубине нагрузка на зонд и скорость его погружения в результате релаксации и ползучести окружающего грунта плавно снижаются с уменьшающейся интенсивностью [4]. В период остановки зонда испытание переводят в необходимый режим, выбор которого зависит от того, какие параметры в результате требуется получить.

Релаксационное испытание позволяет получить параметры сопротивлений грунта аналогичные параметрам при непрерывном задавливании, приведенным выше, однако вместо «скоростных» получают «стабилизированные» значения удельных сопротивлений грунта под конусом и на муфте трения зонда (q_{cs} , МПа и f_{ss} , МПа соответственно) [12]. На основе результатов релаксационного испытания производится расчет предельно-длительного удельного сопротивления грунта под конусом зонда (σ_c , МПа) и на муфте трения зонда (σ_s , МПа) по методике, подробно описанной в работах Н.Г. Волкова, И.С. Соколова [1, 2, 11]. Соотношение перечисленных параметров для мерзлых грунтов следующее: для лобового сопротивления всегда соблюдается соотношение $q_{cv} > q_{cs} > \sigma_c$, причем $q_{cv} = q_{cs}$ (0 сек) в одной точке и на одинаковой глубине, а для бокового трения как $f_{sv} \approx < f_{ss}$, так и $f_{sv} > f_{ss}$, однако f_{sv} и f_{ss} всегда больше σ_s .

При непрерывном задавливании температура зонда, как правило, отличается от температуры грунта. Это связано с тепловыми эффектами в ходе испытания (трение зонда о грунт, а также эффект псевдоаномального

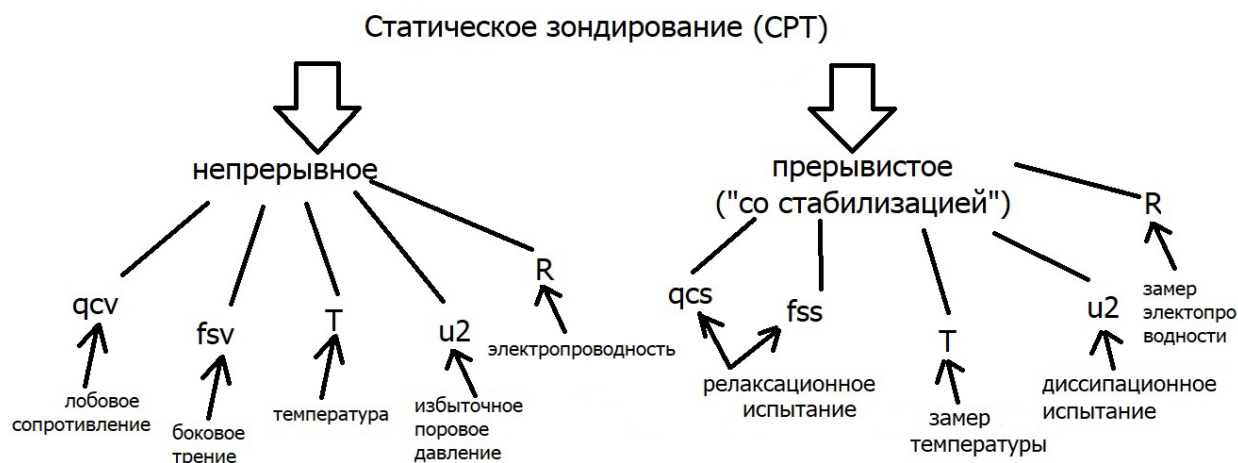


Рис. 2. Параметры, измеряемые при статическом зондировании.

охлаждения [9]). Таким образом, для определения температуры грунта всегда необходимо использовать зондирование в прерывистом режиме («со стабилизацией»), которое позволяет достичь условия равенства температур (ТСРТ) зонда и грунта. Измерение ТСРТ проводят в течение определенного времени после остановки вдавливания зонда параллельно с релаксационным испытанием. Методика подробно изложена в статьях [3, 11].

Диссипационное испытание или тест на рассеивание порового давления (СРТу) позволяет измерить величину избыточного порового давления в течение определенного времени после остановки вдавливания конуса. На основе диссипационных тестов в немерзлых грунтах можно оценить фильтрационные свойства и/или уровень грунтовых вод.

Результаты измерения электропроводности грунта (RCPT), как показывает практика, не изменяются из-за остановки зонда. В обоих вариантах зондирования значения электропроводности получаются одинаковыми. Соответственно, проводить его в «стабилизированном» режиме нецелесообразно.

Статическое зондирование в «скоростном» режиме глубиной до 30 м выполнялось со скоростью 2 см/с, согласно ГОСТ 19912-2012. Тесты в режиме «стабилизации» зонда были сделаны до глубины 25 м от дневной поверхности. Замеры температуры и релаксации напряжения преимущественно осуществлялись в интервале распространения многолетне-мерзлых грунтов (с гл. 7-9 м до гл. 25 м) через 1 м на глубине от 9 до 11 м и через 2-5 м – от 11 до 25 м.

Графики значений лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности при задавливании зонда представлены на рисунке 3. Замеры температуры в процессе выполнения зондирования в июле-августе 2019 года подтвердили наличие мерзлых грунтов на исследуемой площади. Значения температуры в толще мерзлого грунта изменяются от минус 0,9°C до минус 0,1°C.

Отбор образцов мерзлого грунта с использованием «MOSTAR»

Отбор образцов мерзлого грунта выполнялся вдавливаемым пробоотборником типа «MOSTAR» (рис. 4) непосредственно с установки статического зондирования. Указанный пробоотборник, с жестко закрепленным керноприемником и технологией канатного запирающего механизма, обеспечивает точное

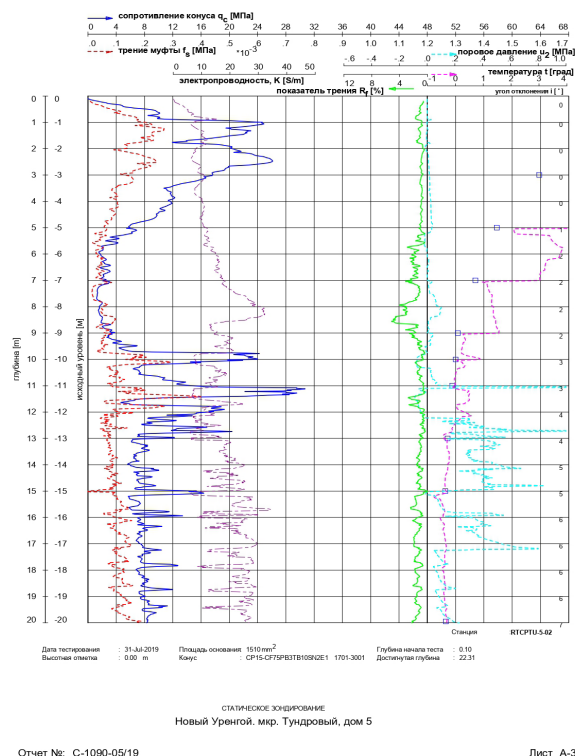


Рис. 3. Пример графика статического зондирования



Рис. 4. Пробоотборник MOSTAR

позиционирование на заданной глубине и минимальное нарушение структуры грунта, что гарантирует получение ненарушенных проб, в том числе для слабых и мерзлых разновидностей грунта.

Отбор ненарушенных образцов с помощью установки «MOSTAR» возможен благодаря использованию вкладыша из пористого нейлона, который снижает возникающее в процессе отбора проб трение. Тонкостенный стакан пробоотборника (лайнер) играет

роль направляющей для цилиндра и в процессе отбора обеспечивает равномерное распределения вкладыша вокруг образца грунта.

После предварительного определения вида грунта в разрезе по результатам статического зондирования и выбора глубины отбора проб, пробоотборник «MOSTAR» присоединяется к штангам установки зондирования и вдавливается до глубины начала интервала отбора проб. Затем для приведения в действие запирающего механизма спускается канатный затвор, проходящий через стержни или обсадную колонну установки и фиксирующийся на конусном седле пробоотборника. Колонна штанг вдавливаются до достижения установкой «MOSTAR» заданной глубины. После этого происходит открытие запирающего механизма, и оператор может извлечь канатный затвор. Затем осуществляется дальнейшее вдавливание пробоотборника на полный интервал опробования до достижения кернорвателем установки заданной глубины окончания отбора проб. Далее осуществляется подъем и отсоединение пробоотборника от колонны штанг зондировочной установки. После чего грунт извлекается из пробоотборника и выкладывается на палетку для последующего описания полевым геологом и фотодокументации.

Пробоотборник позволяет получить керн диаметром 35 мм (1 3/8") и длиной 1000-1300 мм. На объекте отбор образцов осуществлялся в непосредственной близости к точкам статического зондирования (на расстоянии 1-2 м) для достижения достоверности при сопоставлении результатов зондирования и пробоотбора, а также чтобы уменьшить влияние фактора грунтовой неоднородности. Всего было отобрано более 140 образцов, из которых 36 в мерзлом состоянии (рис. 5). Следует подчеркнуть, что отбор мерзлых грунтов

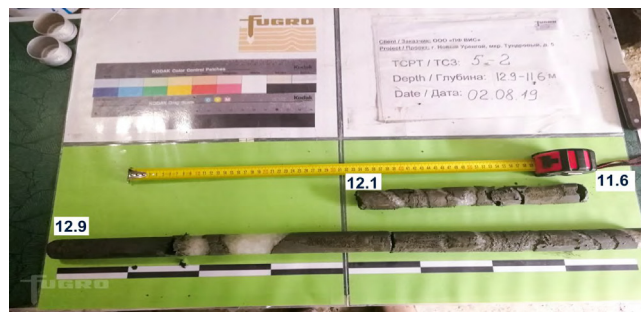


Рис. 5. Отбор образцов мерзлого грунта пробоотборником «MOSTAR»

установкой «MOSTAR» был проведен впервые.

Описанный выше метод отбора проб в ряде случаев может рассматриваться в качестве альтернативы бурению, так как позволяет извлекать образцы грунта ненарушенного сложения.

Полевая лаборатория

Для подтверждения полевого описания исследуемых грунтов и обоснования выделения ИГЭ проводились лабораторные испытания. Они выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 30416-2012 [7] и ГОСТ 5180-2015 [8].

Для глинистых грунтов в лабораторных условиях были определены:

- пределы пластичности (W_L и W_p),
- плотность (ρ),
- плотность частиц грунта (ρ_d),
- естественная влажность (W),
- гранулометрический состав,
- относительное содержание органического вещества (I_r).

Расчетным путем были получены:

- число пластичности (I_p),
- показатель текучести (I_L),
- плотность сухого грунта (ρ_s),
- коэффициент пористости (e),
- коэффициент водонасыщения (S_r).

Для песчаных грунтов определялись гранулометрический состав и естественная влажность (W).

Для мерзлых песчаных и глинистых грунтов дополнительно определялись:

- суммарная влажность мерзлого грунта (W_{tot});
 - влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями (W_m);
 - влажность мерзлого грунта за счёт незамерзшей воды (W_w);
 - плотность мерзлого грунта (ρ).
- Расчетным путем были получены:
- влажность за счёт порового льда (W_{ic});
 - степень заполнения пор мерзлого грунта льдом или незамерзшей водой (S_r);
 - льдистость суммарная (i_{tot});
 - льдистость за счет порового льда (i_{ic});
 - льдистость за счет видимых включений (i_v).

Отбор образцов осуществлялся около точки статического зондирования (на расстоянии 1-2 м) на той же глубине, на которой проводилось испытание в режиме «стабилизации» зонда. Проведенные полевые испытания грунтов в сочетании с

лабораторными определениями показателей их физических свойств позволили выделить инженерно-геологические элементы (ИГЭ) в исследуемом грунтовом массиве. Наше внимание в рамках данной статьи сфокусировано на ИГЭ, представленном мерзлым суглинком.

Характеристика исследуемого грунта и статистическая обработка показателей свойств

Выделенный на исследуемой площадке ИГЭ, представленный мерзлыми суглинками легкими песчанистыми и пылеватыми [6], был достаточно детально изучен с помощью статического зондирования, а также хорошо опробован. Указанный грунт залегает с глубины 10 м, его температура варьирует от минус 0,3°C до минус 0,11°C. Отбор 11 образцов производился на глубинах 10-15 м. В пределах данного слоя было выполнено «скоростное» статическое зондирование в 16 точках, а также 45 тестов в режиме «стабилизации» зонда. Из этого количества испытаний для анализа были отобраны значения из 8 точек. Все рассматриваемые ниже точки зондирования, где проводились тесты, были расположены рядом с местом отбора образцов мерзлого грунта.

Результаты определения характеристик состава и свойств исследуемого грунта представлены в таблицах 1.1-1.4.

Также была проведена статистическая обработка «скоростных» и предельно-длительных значений сопротивления грунта под конусом зонда статического зондирования для данного ИГЭ. Результаты представлены в таблице 2.

Согласно ГОСТ 20522-2012 [5], для обоснования выделения ИГЭ значение коэффициента вариации (V) не должно превышать:

для физических характеристик – 0,15;

для механических – 0,30;

для параметров зондирования – 0,30.

В СТО НОПРИЗ И-005-2017 [13] приведена таблица с коэффициентами вариации (V) для некоторых характеристик грунта, превышение которых не рекомендуется в рамках одного выделяемого ИГЭ:

удельный вес (плотность твердых частиц) грунта – 0,01;

объемный вес (плотность) – 0,05;

природная влажность – 0,15;

влажность на границах текучести и раскатывания – 0,30;

модуль деформации по результатам

полевых и лабораторных испытаний – 0,30;

сопротивление срезу при одном значении уплотняющего давления в лабораторных условиях – 0,20;

временное сопротивление при одноосном сжатии скальных грунтов – 0,40.

Рекомендации по предельным значениям коэффициента вариации для предельно-длительного удельного сопротивления грунта под конусом зонда (σ_c) в опубликованных источниках отсутствуют, поэтому крайне важно определить значения коэффициента вариации, которые не должны превышать в рамках одного выделяемого ИГЭ.

Для характеристик плотности коэффициент вариации, в соответствии с таблицей 3, не превышает значения 0,05. Коэффициент вариации для суммарной весовой влажности W_{tot} составляет 0,16, для влажностей на границах текучести и раскатывания W_L и W_p – 0,10 и 0,11 соответственно, что в целом согласуется с рекомендованными значениями [13].

Таким образом, перечисленные коэффициенты вариации в целом удовлетворяют рекомендациям [5] и [13] по выделению ИГЭ. Следовательно, рассматриваемый слой грунта можно рассматривать как один ИГЭ, охарактеризованный полным комплексом показателей состава и свойств.

Кроме этого, была проведена статистическая обработка результатов статического зондирования указанного ИГЭ. Полученные значения приведены в таблице 4.

Среднее значение скоростного удельного сопротивления грунта под конусом зонда (q_{cv}) составило 7,31 МПа, среднее квадратическое отклонение – 2,72 МПа, а коэффициент вариации (V) – 0,37. Среднее значение предельно-длительного удельного сопротивления грунта под конусом зонда (σ_c) составило 0,91 МПа, среднее квадратическое отклонение – 0,68 МПа, а коэффициент вариации (V) – 0,75.

Известно, что коэффициент вариации используется для оценки неоднородности грунта по одной характеристике. Прямое сравнение значений коэффициентов вариации различных характеристик некорректно. Для сравнения неоднородности по разным характеристикам в пункте 4.4 [5] рекомендуется применять сравнительный коэффициент вариации. Формула для его расчета приведена в приложении А [5].

Рассмотрим сравнительные коэффициенты вариации для показателей статического зондирования (табл. 4). Скоростные значения

Таблица 1.1

Гранулометрический состав исследуемых глинистых грунтов

№ п/п	Кол-во образцов		Глубина отбора образца, м	Содержание частиц, %							мен ь ше 0,002 мм	
				5 - 2 мм	2 - 1 мм	1 - 0,5 мм	0,5 - 0,25 мм	0,25 - 0,10 мм	0,10 - 0,05 мм	0,05 - 0,01 мм		0,01 - 0,002 мм
1	10	10,5	от	A ₅	A ₂	A ₁	A _{0,5}	A _{0,25}	A _{0,1}	A _{0,05}	A _{0,01}	A _{0,002}
			до	4	5	6	7		8	9	10	11
1	10	10,5	15,0	0	$\frac{0,1 - 0,4}{0}$	$\frac{1 - 3}{2}$	$\frac{3 - 11}{7}$	$\frac{10 - 23}{17}$	$\frac{10 - 17}{12}$	$\frac{21 - 35}{25}$	$\frac{14 - 30}{21}$	$\frac{12 - 21}{15}$
Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020												
Суглинок от пылеватого до песчанистого												

Таблица 1.2

Характеристики свойств и температурного состояния исследуемых глинистых грунтов

№ п/п	Глубина отбора образца, м		Параметры состояния		Характеристики состава и свойств				
	от	до	Температура грунта, °С	Температура начала замерзания, °С	Плотность частиц грунта, г/см³	Плотность грунта природного сложения, г/см³	Плотность сухого грунта природного сложения, г/см³	Пористость, %	Коэффициент пористости, д.е.
1	от	до	Т	Т _{нз}	ρ _s	ρ	ρ _d	n	e
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10,5	15,0	$\frac{-0,3 - -0,11}{-0,20 (8)}$	$\frac{-0,15 - -0,06}{-0,11 (8)}$	$\frac{2,6 - 2,69}{2,66 (10)}$	$\frac{1,98 - 2,17}{2,07 (10)}$	$\frac{1,60 - 1,89}{1,75 (10)}$	$\frac{29 - 40}{34 (9)}$	$\frac{0,42 - 0,67}{0,52 (9)}$
Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011									
Суглинок от пылеватого до песчанистого, легкий, пластичномерзлый, слабольдистый, незасоленный									

Характеристики состава исследуемых глинистых грунтов

№ п/п	Глубина отбора образца, м		Характеристики состава и свойств				
			Суммарная весовая влажность, %	Влажность между включениями, %	Влажность за счет ледяных включений, %	Влажность за счет незамерзшей воды, %	Л ь д и с т ь суммарная, д.е.
	от	до	W_{tot}	W_m	W_i	W_w	i_{tot}
	1	2	3	4	5	6	7
1	10,5	15,0	$\frac{14,99 - 23,62}{18,24 (10)}$	$\frac{14,99 - 23,62}{18,19 (10)}$	$\frac{0,0 - 0,54}{0,05 (10)}$	$\frac{9,3 - 21,4}{14,5 (8)}$	$\frac{0,02 - 0,19}{0,08 (7)}$
Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020			Суглинок от пылеватого до песчанистого, легкий, пластичномерзлый, слабодисстый, незасоленный				

Характеристики состава и свойств исследуемых глинистых грунтов

№ п/п	Глубина отбора образца, м	Характеристики состава и свойств			
		Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности, %	Показатель текучести, д.е.
	от до	W_L	W_p	I_p	I_L
	1 2	3	4	5	6
1	10,5 15,0	$\frac{20 - 28}{24 (10)}$	$\frac{13 - 17}{15 (10)}$	$\frac{7 - 11}{9 (10)}$	$\frac{0,24 - 0,59}{0,39 (10)}$
Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020		Суглинок от пылеватого до песчанистого, легкий, пластично-мерзлый, слабодисстый, незасоленный			

Таблица 2

Результаты статического зондирования исследуемых глинистых грунтов

Кол-во точек зондирования	Глубина исследования, м		Результаты статического зондирования		
			Температура грунта, °С	Скоростное удельное сопротивление грунта под конусом зонда, МПа	Предельно-длительное удельное сопротивление грунта под конусом зонда, МПа
	от	до	T	q_{cv}	σ_c
1	2	3	4	5	6
10	10,5	15,0	$\frac{-0,30 - -0,11}{-0,20 (8)}$	$\frac{4,22 - 13,52}{7,31 (10)}$	$\frac{0,08 - 1,89}{0,91 (10)}$
Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020				Суглинок от пылеватого до песчанистого, легкий, пластичномерзлый, слабодистый, незасоленный	

Таблица 4

Статистическая обработка результатов статического зондирования грунтов

<div>Показатели статического зондирования</div> <div>Глубина исследования, м</div>		Скоростное удельное сопротивление грунта под конусом зонда, МПа	Предельно-длительное удельное сопротивление грунта под конусом зонда, МПа
от 10.9 до 15.0		q_{cv}	σ_c
1	2	3	4
A_{cp}	Среднее значение	7,31	0,91
σ	Среднее квадратическое отклонение	2,72	0,68
V	Коэффициент вариации	0,37	0,75
$V_{срав}$	Сравнительный коэффициент вариации	0,88	0,82

Таблица 3

Статистическая обработка значений характеристик состава и свойств грунтов

Глубина отбора образцов, м		Характеристики состава и свойств										Плотность частиц грунта, г/см ³	Плотность грунта природного сжатия, г/см ³	Плотность сухого грунта прироста	Пористость, %	Коэффициент пористости, д.е.	Суммарная весовая влажность, %	Влажность между ледяными включениями, %	Влажность за счет ледяных включений, %	Влажность за счет замерзшей воды, %	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности, %	Показатель текучести д.е.	Льдистость суммарная, д.е.
	Глубина отбора образцов, м											ρ_s	ρ	ρ_d	n	e	W_{tot}	W_m	W_i	W_w	W_L	W_p	I_p	I_L	i_{tot}
												1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A_{cp}	Среднее значение											2,66	2,07	1,75	34	0,52	18,24	18,19	0,05	14,5	24	15	9	0,39	0,08
σ	Среднее квадратическое отклонение											0,03	0,06	0,08	3,56	0,08	2,94	3,00	0,17	3,99	2,45	1,66	1,26	0,13	0,07
V	Коэффициент вариации											0,01	0,03	0,05	0,10	0,16	0,16	0,16	3,16	0,28	0,10	0,11	0,14	0,32	0,80
$V_{срав}$	Сравнительный коэффициент вариации											0,44	0,65	0,55	0,72	0,76	0,90	0,94	3,16	0,77	0,69	1,04	0,62	0,83	1,04

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

сопротивлений грунта под конусом зонда, измеренные непосредственно на глубине испытания со «стабилизацией», являются частной выборкой из всех скоростных значений. В результате проведения релаксационного испытания были получены предельно-длительные сопротивления грунта под конусом зонда. Статистическая обработка показала, что сравнительный коэффициент вариации $V_{\text{срав}}$ для скоростных и предельно-длительных значений достаточно близок и равен 0,88 и 0,82 соответственно.

Анализ полученных закономерностей показывает, что вариативность измеренных значений предельно-длительного сопротивления сопоставима с вариативностью результатов, полученных при выполнении статического зондирования в непрерывном режиме. Это подтверждается близостью значений сравнительных коэффициентов вариации ($V_{\text{срав}}$). Таким образом, значение коэффициента вариации (V) 0,75 для предельно-длительного сопротивления грунта (табл. 4) можно рекомендовать как допустимую величину, превышение которой не рекомендуется в рамках одного выделяемого ИГЭ.

Выводы

Впервые показано, что применение оборудования для статического зондирования и пробоотборника «MOSTAR» возможно для условий многолетнемерзлых грунтов, а также отобраны пробы мерзлого грунта ненарушенного сложения с глубины от 10 до 15 метров;

На основе данных статического зондирования и результатов лабораторных определений показателей физических свойств грунтов, в исследуемой толще были обосновано выделены инженерно-геологические элементы, в том числе ИГЭ, представленный многолетнемерзлыми суглинками;

Статистическая обработка полученных результатов полевых (статическое зондирование) и лабораторных испытаний (определение физических свойств) позволила сравнить показатели неоднородности грунта по различным характеристикам;

Рекомендовано значение коэффициента вариации для предельно-длительного удельного сопротивления грунта под конусом зонда в мерзлых грунтах в качестве допустимой величины, превышение которой не рекомендуется в рамках одного выделяемого ИГЭ.

Волков Н.Г., Соколов И.С. Методика расчета несущей способности свай в многолетнемерзлых грунтах на основе измерений релаксации напряжения, полученных с помощью статического зондирования / Н.Г. Волков // Сборник докладов Межд. н.-т. конф. «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах». – М., 2018, – С. 36–42.

Волков Н.Г., Соколов И.С. Расчет несущей способности свай на основе определения длительной прочности в массиве мерзлых грунтов методом статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Геотехника. – 2019. – № 1. – С. 68–78.

Волков Н.Г., Соколов И.С. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной термометрии / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Инженерные изыскания. – 2018. – № 7–8. – С. 16–24.

ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием (Издание с Изменением N 1).

ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.

ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация (с Поправками).

ГОСТ 30416-2012 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.

ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

Исаев О.Н., Волков Ф.Е., Минкин М.А., 1987. Определение несущей способности свай в пластичномерзлых грунтах статическим зондированием. Основания, фундаменты и механика грунтов. №5, с. 17–19.

Рыжков И. Б., Исаев О.Н., 2010. Статическое зондирование грунтов. АСВ, Москва.

Соколов И.С. Методика определения прочностных свойств мерзлых грунтов статическим зондированием: дис. канд. геол.-минер. наук: 25.00.08. - Моск. гос. университет, Москва, 2020 – 149 с.

СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменениями N 1-4).

СТО НОПРИЗ И-005-2017 Инженерно-геологические изыскания. Составление прогноза изменений инженерно-геологических

условий.

Buteau, S., Fortier, R., and Allard, M. 2005. Rate-Controlled Cone Penetration Tests in Permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (1): pp. 184–197.

Fortier R., Yu W. Penetration rate-controlled electrical resistivity and temperature piezocone penetration tests in warm ice-rich permafrost in Northern Quebec (Canada)// *Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development in a Changing Cold Environment*, 2012, p. 757-767.

Volkov N., Sokolov I., Jewell R., 2018. Cone penetration testing of permafrost soils. *Proceedings 5th European Conference on Permafrost*, 2018, Chamonix Mont Blanc, France, pp. 215-216.

Volkov N., Sokolov I., Jewell R., 2018. CPT Testing in Permafrost. *Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing. CPT'18*, Delft, Netherlands, 2018, pp. 1258-1268.