

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Соколов Иван Сергеевич**

**Методика определения прочностных свойств мерзлых грунтов  
статическим зондированием**

Специальность 25.00.08 — Инженерная геология, мерзлотоведение и  
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре геокриологии геологического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова

**Научные руководители**

— **Исаев Владислав Сергеевич,**  
кандидат геолого-минералогических наук

**Волков Николай Генрихович,**  
кандидат геолого-минералогических наук

**Официальные оппоненты**

— **Фоменко Игорь Константинович,**  
доктор геолого-минералогических наук, ФГБОУ  
ВО «Российский государственный  
геологоразведочный университет имени Серго  
Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ),  
Гидрогеологический факультет, кафедра  
инженерной геологии, профессор

**Болдырев Геннадий Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства», старший  
научный сотрудник

**Алексеев Андрей Григорьевич,**  
кандидат технических наук, АО "Научно-  
исследовательский центр "Строительство",  
(НИИОСП) Научно-исследовательский, проектно-  
изыскательский и конструкторско-  
технологический институт оснований и  
подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова  
(Москва), руководитель центра геокриологических  
и геотехнических исследований

Защита диссертации состоится «16» октября 2020 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:  
<https://istina.msu.ru/dissertations/284403489/>

Автореферат разослан «03» сентября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук

Н.А. Харитонова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Интенсивное освоение арктических территорий, строительство, развитие инфраструктуры северных городов требует привлечения новых современных технологий строительства, для которых, в свою очередь, необходимо использование более точных и детальных методов инженерных изысканий и геотехнического мониторинга. Основными методами изучения свойств мерзлых грунтов являются: инженерно-геологическое бурение скважин, термометрия в скважинах, геофизические исследования, лабораторные методы определения физико-механических свойств и испытания свай статическими или динамическими нагрузками. Метод статического зондирования грунтов широко применяется для изучения немерзлых дисперсных грунтов, в частности для оценки их прочностных и деформационных свойств. Для изучения мерзлых грунтов метод статического зондирования практически не используется. Это обусловлено как сравнительно небольшим опытом проведения испытаний, так и отсутствием методов обработки и интерпретации данных статического зондирования в специфических условиях мерзлых грунтов. В связи с этим возникает необходимость разработки новых методик статического зондирования и обработки получаемых данных, которые будут учитывать специфику механики дисперсных мерзлых грунтов.

**Степень разработанности темы исследования.** Результаты исследований, касающиеся применения полевых испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием, представлены в работах Ф.Е. Волкова, Л.Н. Воробкова, О.Н. Исаева, Б. Ладанного, Т. Лунна, А. МакКаллума, М.А. Минкина, Ю.Г. Трофименкова, Р. Фортье и других авторов.

Природа и особенности реологических свойств грунтов отражена в работах А. Бишопа, С.С. Вялова, М.Н. Гольдштейна, С.Е. Гречищева, Ю.К. Зарецкого, Р.С. Зиангирова, А.Ю. Ишлинского, Р.Г. Кальбергенова, В.А. Королёва, М. Рейнера, Л.Т. Роман, А. Скемптона, Н.А. Цытовича и других авторов.

**Цель работы** — определение величины длительной прочности мерзлых грунтов на сжатие и сдвиг в полевых условиях методом статического зондирования.

### **Задачи работы:**

1. Выполнить анализ и обобщение опубликованных материалов по теме механики мерзлых грунтов, включая испытания мерзлых грунтов методом статического зондирования.

2. Разработать методику исследования мерзлых грунтов статическим зондированием для определения их длительной прочности.

3. Выполнить полевые исследования мерзлых грунтов с помощью статического зондирования в соответствии с разработанной методикой.

4. Выявить особенности кривой релаксации напряжения, вызванного внедрением зонда в мерзлый грунт в процессе испытания в режиме «стабилизации».

5. Провести проверку разработанной методики в полевых условиях путем сравнения результатов определения несущей способности сваи по статическому зондированию и по испытанию натурной сваи статической вдавливающей нагрузкой.

**Объектом исследования** являются многолетнемерзлые дисперсные грунты различного состава и генезиса, находящиеся в зоне инженерно-строительного воздействия и распространенные на площадках в районе городов Воркута, Лабытнанги, Новый Уренгой, Салехард и севера полуострова Гыданский.

**Предметом исследования** является релаксация напряжения в массиве мерзлых грунтов, вызванного внедрением зонда (металлического индентора).

**Фактический материал** получен автором лично в 2015–2019 гг. в ходе проведения полевых испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием в рамках учебной практики МГУ в районе г. Воркута и производственных инженерно-геологических изысканий на различных строительных площадках севера Западной Сибири, выполненных ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» (международная группа компаний Фугро).

**Научная новизна работы** заключается в следующих результатах:

1. Впервые выполнены полевые исследования твердомерзлых грунтов и мерзлых грунтов, подвергшихся искусственному охлаждению термостабилизаторами, на площадках, различных по геокриологическим условиям, с измерением релаксации напряжений под наконечником зонда и по муфте трения.

2. Разработана новая методика проведения статического зондирования мерзлого грунта с остановками зонда для измерения релаксации напряжений (зондирование со стабилизацией), которая позволяет определять значения длительной прочности для любого заданного промежутка времени.

3. Установлено и показано разделение получаемой кривой релаксации напряжения на два участка, что позволяет получить однозначное решение уравнения длительной прочности мерзлого грунта для конкретного замера в режиме релаксации напряжений (зондирование со стабилизацией).

4. Разработана новая методика обработки данных для определения длительной прочности мерзлых грунтов на сжатие и сдвиг при статическом зондировании со стабилизацией.

5. Разработано приложение к программе сбора полевых данных, позволяющее в полевых условиях определять длительную прочность путем построения опережающей кривой для данных о температуре и длительной прочности, что позволяет точно установить величину длительной прочности на

сжатие и сдвиг (II участок опытной кривой релаксации напряжения), а также оптимизировать время замера температуры грунтов.

6. В результате опытной проверки разработанной методики выявлено совпадение данных несущей способности сваи, полученных при испытании статическим зондированием в непосредственной близости от нее, с данными, полученными в ходе испытаний сваи статической вдавливающей нагрузкой.

**Практическое значение диссертационной работы:**

Разработанная методика исследования свойств мерзлых грунтов с помощью статического зондирования использована в научной и производственной деятельности компании «ГЕОИНЖСЕРВИС» (международная группа компаний Фугро) при выполнении полевых испытаний мерзлых грунтов и камеральной обработке результатов инженерно-геологических изысканий для различных объектов, среди которых мост через р. Обь в районе города Салехард, участок железной дороги Обская-Салехард (подход к мосту в пойме р. Обь), а также другие объекты капитального строительства в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Впервые проведены полевые испытания мерзлых грунтов методом статического зондирования не только для научных исследований, но и для получения исходных данных о свойствах грунтов для целей промышленного и гражданского строительства. Автором проведены показательные испытания грунтов статическим зондированием с измерением температуры в ходе выполнения студентами Воркутинской и Звенигородской полевых инженерно-геокриологических практик Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

**Личный вклад.** Все основные результаты исследований, приведенные в защищаемой диссертации, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором выполнены полевые испытания мерзлых грунтов с помощью статического зондирования, проведена обработка материалов и разработана новая методика статического зондирования для исследования мерзлых грунтов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. **Разделение получаемого опытного графика релаксации напряжений на два участка с помощью опережающей кривой позволяет задать критерий стабилизации и достичь его выполнения в полевых условиях.** Разработанный подход впервые позволяет однозначно определить эмпирические коэффициенты уравнения длительной прочности.

2. **Новая методика проведения полевых испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием со стабилизацией позволяет определить значения их длительной прочности на сжатие и сдвиг.** Особенность предложенной методики заключается в возможности определения длительной прочности мерзлых грунтов в массиве непосредственно в полевых условиях.

**3. Расчет длительной несущей способности сваи в мерзлых грунтах по данным статического зондирования выполняется без использования эмпирических коэффициентов и для любого заданного промежутка времени.** Предлагаемый расчет впервые позволяет провести прямое сравнение рассчитанной несущей способности сваи по результатам статического зондирования со значениями несущей способности, измеренной в ходе натурного испытания сваи статической нагрузкой. В расчете по результатам статического зондирования длительная прочность рассчитывается на период приложения статической нагрузки в ходе натурного испытания сваи или на период эксплуатации сооружения.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на 9 научно-практических конференциях и семинарах: XI International Conference on Permafrost, г. Потсдам, Германия, 20–24 июня 2016 г.; XI Международный симпозиум по проблемам инженерного мерзлотоведения, г. Магадан, 5–8 сентября 2017 г.; Семинар на кафедре геокриологии, геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, 15 ноября 2017 г.; День науки 2018, Звенигородская биостанция МГУ им. М.В. Ломоносова, 22–23 января 2018 г.; Московское общество испытателей природы, секция Инженерной геологии, г. Москва, 17 мая 2018 г.; 4th International Symposium on Cone Penetration Testing 2018 (CPT'18), г. Дельфт, Нидерланды, 21–23 июня 2018 г.; 5<sup>th</sup> European Conference on Permafrost (EUCOP 2018), г. Шамони-Мон Блан, Франция, 23 июня – 1 июля 2018 г.; Научно-практическая конференция «Обдория. Современные научные исследования в Арктике» (Х юбилейная конференция), ЯНАО, г. Салехард, 26–27 ноября 2018 г.; Научно-техническая конференция «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах», г. Москва, 14–15 ноября 2018 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ общим объемом 10,1 п.л., в том числе 3 статьи (объемом 3,8 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, 6 глав, основных выводов и списка литературы. Содержит 149 стр. машинописного текста, 78 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 112 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и признательность к.г.-м.н. Н.Г. Волкову и к.г.-м.н., старшему научному сотруднику кафедры геокриологии геологического факультета МГУ В.С. Исаеву за руководство на всех этапах подготовки работы от теоретических основ метода до проведения полевых исследований, ценные советы и замечания. Автор искренне признателен коллективу ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», директору Д.А. Ванькову за всестороннюю поддержку

проводимой работы и старшему оператору статического зондирования А.М. Бузеку за высочайший профессионализм в ходе пионерных испытаний мерзлых грунтов. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь и содействие в организации полевых исследований директору Научного центра изучения Арктики (г. Салехард), к.г.-м.н. А.И. Синицкому, а также магистранту Д.В. Лагоше за помощь в обработке полевых данных. Автор искренне признателен профессорам кафедры геокриологии д.т.н. Л.Н. Хрусталеву и д.г.-м.н. И.А. Комарову и доцентам к.г.-м.н. С.Н. Булдовичу и к.г.-м.н. Г.И. Гордеевой за ценные советы и рекомендации, а также благодарен всем сотрудникам кафедры геокриологии за участие в обсуждении работы и содействие в процессе оформления диссертации. Особую благодарность автор выражает к.г.-м.н. И.А. Бражнику за оказанную помощь, ценные советы и рекомендации, полученные в процессе написания и оформления диссертации. Поклон моим родным и близким за поддержку, терпение и веру в меня на всех этапах этого исследования.

## **Глава 1. Физико-механические свойства мерзлых грунтов и методы их изучения**

Вопросы изучения механики мерзлых грунтов отражены в работах таких авторов как В.И. Аксенов, О. Андерсленд, С.С. Вялов, С.Е. Гречишев, Ю.К. Зарецкий, Р.С. Зиангиров, Р.Г. Кальбергенов, Б. Ладанный, Л.Т. Роман, Н.А. Цытович и других.

Проведенный анализ литературных материалов позволяет сделать следующие выводы:

1. Механика мерзлых грунтов отличается от немерзлых в силу наличия в их составе льда, особенностей строения и структурных связей. Главным отличительным свойством является зависимость прочности мерзлого грунта от времени приложения нагрузки. Деление грунтов на твердомерзлые и пластичномерзлые выполняется исходя из их коэффициента сжимаемости. Существующее в практике ограничение на применение статического зондирования только на пластиично-мерзлых грунтах является необоснованным.

2. Обзор существующих лабораторных методов определения механических характеристик мерзлых грунтов выявил следующие основные ограничения. Извлечение и доставка образцов мерзлого грунта от площадки изысканий до лаборатории в естественном (ненарушенном) состоянии при естественной температуре практически неосуществимы, а большинство лабораторных испытаний проводится на образцах с восстановленной структурой и при температуре, отличной от естественной. Воссоздание естественной температуры в образце мерзлого грунта в диапазоне  $0 - -1^{\circ}\text{C}$  является затруднительным.

3. Для ускорения проведения испытания, как в полевых, так и лабораторных методах, вводится понятие «условной стабилизации», что приводит к сокращению

сроков проведения самих испытаний, однако вносит системные ошибки в результаты испытаний. Для компенсации этих ошибок используются эмпирические поправочные коэффициенты.

4. Полевые методы дают существенно более точные результаты в сравнении с лабораторными, поскольку они проводятся в массиве грунта. Однако основным ограничением является их малая глубина (до 8–10 м), сложность подготовки массива грунтов к испытаниям и продолжительное время стабилизации температуры после подготовки массива.

Таким образом существует необходимость в разработке эффективных, доступных и точных методов исследования мерзлых грунтов.

## **Глава 2. Технология статического зондирования грунтов**

Статическое зондирование — перспективный метод для исследования мерзлых грунтов. Метод является одним из основных в инженерно-геологических и геотехнических изысканиях в дисперсных грунтах. Применение зондов, в которых измерения производятся с помощью электрических датчиков, таких как тензометрические датчики силы и комплект дополнительных измерительных устройств позволяет непрерывно вести запись удельного лобового сопротивления ( $q_c$ ), трение вдоль муфты ( $f_s$ ) и порового давления ( $u_2$ ), измеряемых в Па, а также температуры (°С).

Статическое зондирование лишено вышеперечисленных недостатков полевых методов испытаний мерзлых грунтов. Учитывая ограничения лабораторных методов испытаний мерзлых грунтов, статическое зондирование может служить источником ценной информации для корректного воссоздания естественных условий при испытаниях образцов грунта в лаборатории.

Проведенный обзор мирового опыта зондирования мерзлых грунтов показывает, что подход к выполнению испытаний, при котором ведется последовательное уменьшение скорости зондирования с целью компенсации проявлений вязко-пластичных свойств мерзлого грунта, не целесообразен, поскольку уменьшение скорости внедрения зонда нивелирует основное преимущество статического зондирования, как экспресс-метода.

Выдвинутый советскими инженерами в 60–70-е годы XX в. способ проведения зондирования со стабилизацией, выглядит более перспективным в связи с тем, что в ходе испытаний могут быть получены 2 набора данных: без стабилизации (при скорости 2 см/с) и со стабилизацией, когда считываются показания неподвижного зонда в состоянии предельного равновесия. В 80-е годы XX в. была попытка применить этот способ для испытаний мерзлых грунтов в так называемом «релаксационно-ползучем режиме» под нагрузкой. Однако этот способ развития не получил ввиду недостаточной технической оснащенности и неудачи в попытках интерпретации получаемых результатов.

### Глава 3. Разработка методики измерения температуры мерзлых грунтов с помощью зонда с температурным датчиком

При выполнении статического зондирования со стабилизацией выполняется замер температуры грунтов при помощи термодатчика, установленного в нижней части зонда. Такое положение термодатчика позволяет выполнять точный замер температуры грунта за короткое время при плотном контакте датчика с грунтом на заданной глубине после остановки движения зонда. Согласно СП 25.13330.2012 критерий стабилизации температуры зонда достигается, когда изменение температуры термодатчика составит менее  $0,05^{\circ}\text{C}$  за последние 5 минут замера. Такой замер может занимать чрезвычайно продолжительное время, особенно в немерзлом грунте. Для оптимизации времени замера температуры и его точности разработана дополнительная методика измерения температуры грунтов. При замере температуры производится обработка «хвоста» температурной кривой, исходя из предположения, что изменение температуры грунта подчиняется следующему уравнению:

$$T(t) = \frac{A}{t} + T_0 , \quad (1)$$

где  $T(t)$  — измеряемая температура,  $A$  — коэффициент пропорциональности,  $t$  — время,  $T_0$  — естественная температура грунта.

Обработка происходит параллельно со считыванием данных температуры зонда и каждую секунду на экране полевого терминала сбора данных строится «опережающая» кривая температуры грунта. Когда изменение температуры начинает следовать уравнению (1) с постоянными коэффициентами, «опережающая» кривая температуры на экране терминала сбора данных принимает горизонтальный вид, а значение  $T_0$  соответствует естественной температуре грунта.

Разработанная методика проверена в полевых условиях на опытной площадке путем сравнения с результатами скважинной термометрии. В Таблица 1 приведены результаты трех отдельных замеров температуры грунта, полученные с помощью зонда (столбец 2) и двух термокос в скважинах различного диаметра. Скважина СРТ-32 —  $\varnothing 32$  мм (столбец 3); скважина ВН-90 —  $\varnothing 89$  мм (столбец 4).

Измеренная температура мерзлых грунтов составила от  $-0,08^{\circ}\text{C}$  до  $-0,26^{\circ}\text{C}$ . Расхождение замеренных значений температуры с помощью статического зондирования и с помощью термокос в двух скважинах (столбцы 5 и 6) изменяется в пределах от  $-0,15^{\circ}\text{C}$  до  $+0,11^{\circ}\text{C}$  и в среднем составляет  $-0,02^{\circ}\text{C}$ . Был проведен анализ соотношения доверительных интервалов, получаемых данных по двум видам измерительных приборов — зонд и термокоса. Показано, что во всех полученных парах значений (зонд — термокоса), наблюдалось взаимное пересечение доверительных интервалов.

**Таблица 1 — Измеренная температура грунтов в ходе сравнительных испытаний (составлено автором)**

Глубина, м	Температура грунта, °C			Расхождения в замерах температуры грунта, °C	
	статическое зондирование (CPT)	скважина CPT-32	скважина BH-90	$\Delta$ (CPT – скв.СPT-32)	$\Delta$ (CPT – скв.BH-90)
1	2	3	4	5	6
2,0	-0,25	-0,25	-0,10	0,00	-0,15
3,0	-0,23	-0,25	—	0,02	—
3,5	-0,21	-0,13	-0,24	-0,08	-0,03
4,0	-0,21	-0,12	—	-0,09	—
4,5	-0,10	-0,06	-0,12	-0,04	-0,02
5,0	-0,08	-0,18	—	+0,10	—
5,5	-0,10	-0,12	-0,25	+0,02	+0,15
6,0	-0,12	-0,07	—	-0,05	—
6,5	-0,22	—	—	—	—
7,0	-0,26	-0,12	—	-0,14	—
7,5	-0,12	—	-0,13	—	-0,01
8,0	0,12	0,19	—	-0,07	—
8,5	0,31	—	0,19	—	+0,12
9,0	0,61	0,50	—	+0,11	—
10,0	0,81	0,68	--	+0,13	--
11,0	1,04	1,06	--	-0,02	--

Применение разработанной методики измерения температуры показало хорошее совпадение между значениями температуры, полученными с помощью измерения термокосами и статическим зондированием. Это дает эмпирическое обоснование использованию данной методики в практических исследованиях.

#### Глава 4. Разработка методики измерения длительной прочности мерзлого грунта методом статического зондирования

Для расчетов оснований сооружений и прогноза устойчивости оснований на мерзлых грунтах используется длительная прочность грунтов основания. Длительная прочность определяется напряжением, которое вызывает разрушение материала за заданный промежуток времени. Под предельной длительной прочностью подразумевается напряжение, до превышения которого разрушения грунта не наступает, в то время как при его превышении развивается прогрессирующая ползучесть, приводящая к разрушению. Для оценки величины длительной прочности существуют два подхода. В первом измеряется деформация грунта от приложенной постоянной заданной нагрузки, которая задается ступенями до величины нагрузки, при которой наступает разрушение мерзлого грунта. Измеренная деформация характеризует ползучесть мерзлого грунта. Во втором подходе измеряется напряжение в грунте, вызванное приложенной мгновенной нагрузкой, не превышающей мгновенную прочность мерзлого грунта, и последующего поддержания постоянной деформации мерзлого грунта. Измеренное уменьшение напряжения во времени называют релаксацией напряжения. В случае испытания грунтов методом статического зондирования со «стабилизацией» применяется второй подход.

Релаксация напряжения является следствием перераспределения соотношения долей упругой и пластической деформаций в мерзлом грунте при неизменной величине общей суммарной деформации. Следует учитывать, что такое перераспределение доли упругой компоненты деформации в пластическую происходит в мерзлом грунте не при любой нагрузке, а только после того, как возникшее напряжение превысит некоторый предел, который зависит от гранулометрического состава и строения грунта, и определяется условиями его формирования.

В механике сплошных сред попытки вывести единое выражение, отображающее весь ход релаксационной кривой, не дали результатов. Однако, в металловедении был предложен способ выведения аналитического выражения для двух участков кривой релаксации напряжения в отдельности (Рисунок 1). При этом за основу такого деления берется представление о различных механизмах релаксации на I и II участках.

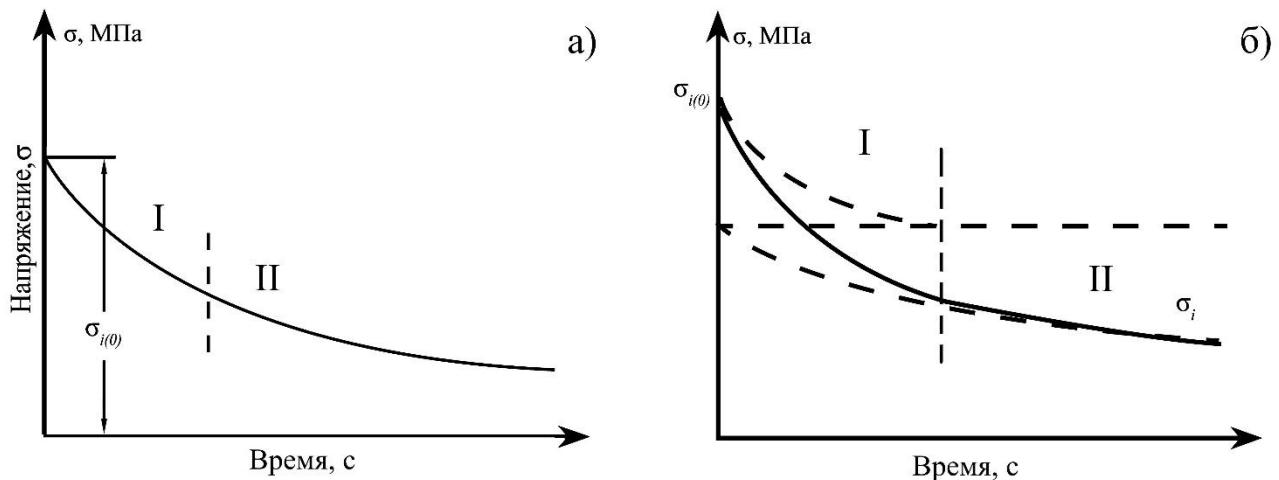


Рисунок 1 — Схема кривой релаксации напряжений (а) и ее интерпретация (б)

Предполагается, что I участок кривой релаксации определяется действием процессов, протекающих на границах зерен поликристаллического металла. Участок II кривой релаксации напряжения определяется действием сдвиговых явлений при пластической деформации в теле зерна металла.

На основе вышеизложенных теоретических основ, разработана новая методика определения длительной прочности мерзлого грунта на сжатие и длительной прочности мерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания в массиве статическим зондированием. В процессе движения зонда грунту сообщается нагрузка, превышающая величину мгновенной прочности, но при остановке движения зонд фиксируется и ведется запись релаксации напряжений. При этом начальная нагрузка на ненарушенный нижележащий массив мерзлого грунта составляет предельную до наступления разрушения величину. Полученные данные обрабатываются раздельно по датчикам лобового сопротивления и трения грунта по боковой поверхности уравнениями длительной прочности. Обработка результатов статического зондирования проводится с использованием

логарифмической функции, предложенной С.С. Вяловым для динамометрического метода.

Логарифмическое уравнение длительной прочности:

$$\sigma = \frac{\beta}{\ln \frac{t_p+1}{T}} , \quad (2)$$

где  $\sigma$  – замеряемое напряжение (лобовое сопротивление или боковое трение), МПа;  $t_p$  – время замера;  $\beta$ ,  $T$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от характера релаксации напряжения.

Для обработки полевых замеров релаксации напряжения логарифмическое уравнение длительной прочности преобразовывают в линейное уравнение вида  $y=kx+b$ :

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\beta} \cdot \ln(t_p + 1) - \frac{1}{\beta} \cdot \ln T , \quad (3)$$

$$\text{где } y = \frac{1}{\sigma}, x = \ln(t_p + 1), k = \frac{1}{\beta}, b = -\frac{1}{\beta} \cdot \ln T.$$

Аппроксимация данного уравнения позволяет найти эмпирические коэффициенты  $\beta$  и  $T$  и восстановить уравнение длительной прочности для каждого релаксационного испытания отдельно. Однако, при выборе участка кривой от начала теста до некоторого условного завершения теста коэффициенты  $\beta$  и  $T$  не постоянны. При анализе данных статического зондирования было установлено, что, если выбирать участок кривой не с начала теста, а с некоторого момента времени, эмпирические коэффициенты  $\beta$  и  $T$  становятся постоянными. Этот момент времени интерпретируется как начало II участка кривой релаксации, начиная с которого кривая релаксации измеряемого напряжения (лобового сопротивления или бокового трения) подчиняется приведенному выше уравнению длительной прочности (2).

В результате анализа полученных данных статического зондирования установлено, что время начала II участка кривой релаксации не постоянно и меняется от первых сотен секунд до первых десятков минут. Для решения этой неопределенности был разработан алгоритм для определения времени начала II участка кривой релаксации. Для обработки линеаризованной функцией выбирается интервал кривой, например, в 100 секунд. На Рисунок 2а представлен интервал от 600-й до 700-й секунды (красный цвет), который обрабатывается логарифмическим уравнением длительной прочности. Кривая релаксации перестраивается в логарифмических координатах, а полученный отрезок аппроксимируется линейной функцией (Рисунок 2б, красный цвет) и вычисляются коэффициенты  $k$  и  $b$  для конкретного участка измеряемой кривой. Далее рассчитываются эмпирические коэффициенты  $\beta$  и  $T$ , выводится функция длительной прочности ( $\sigma_c$ ) и рассчитывается длительная прочность грунта на 10 дней и 100 лет или на любой другой период времени.

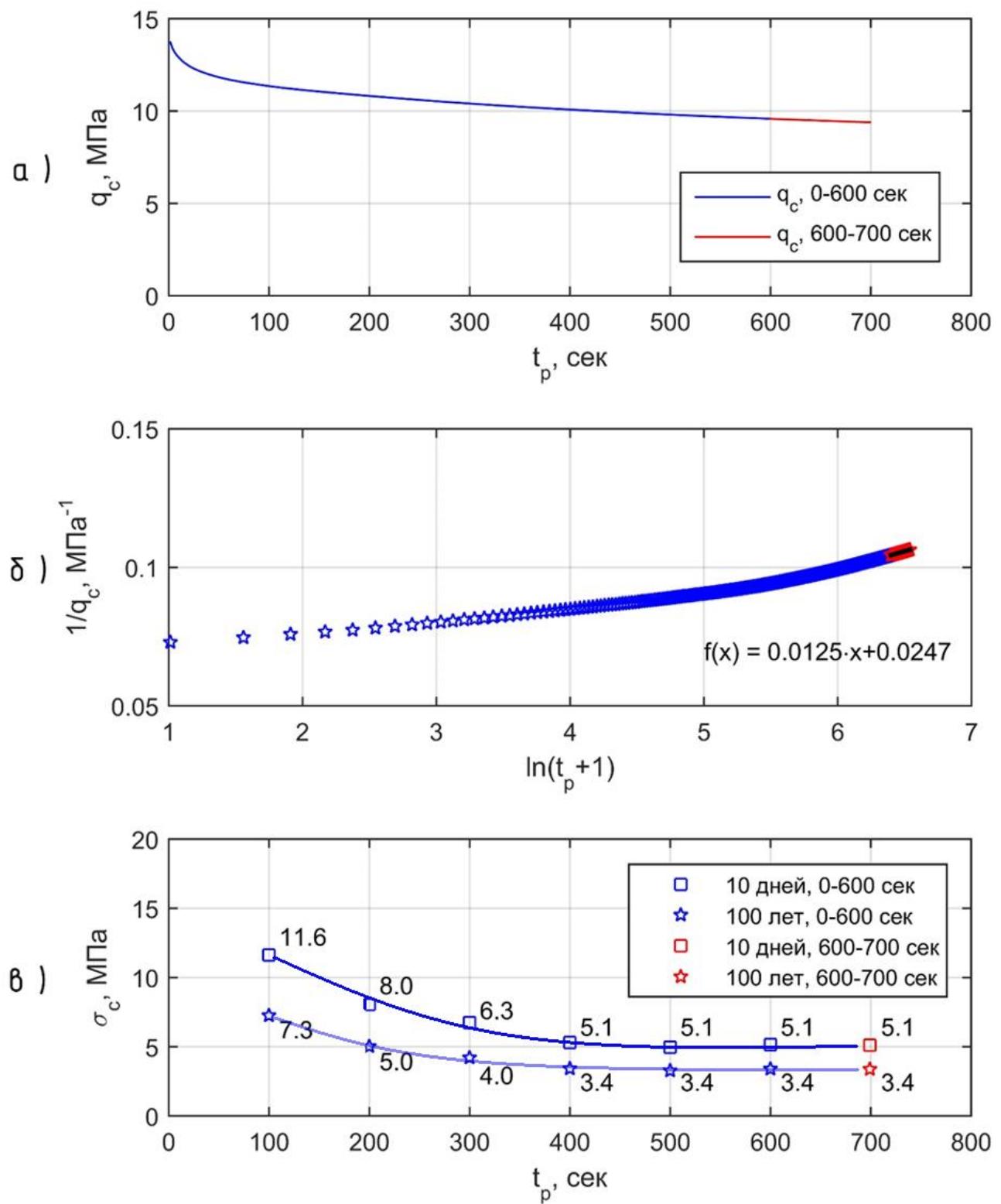


Рисунок 2 — Пример обработки кривой релаксации лобового сопротивления по предлагаемой методике, где а) — кривая релаксации напряжения; б) — линеаризация кривой в обратных и логарифмических координатах; в) — рассчитанные значения длительной прочности

Для интервала от 600-й до 700-й секунды длительная прочность на 100 лет составила 3,4 МПа (Рисунок 2в). Аналогично, были рассчитаны значения длительной прочности для интервалов 0–100 сек, 100–200 сек и т.д. Видно, что

рассчитанные значения длительной прочности, начиная с 400-й секунды, стабилизировались и равны 3,4 МПа для 100 лет (Рисунок 2в).

При полевых испытаниях считывание данных задается один раз в секунду или чаще и количество итераций соответственно равно количеству считываний. Приведенный вычислительный алгоритм разработан автором и внедрен в используемое полевое программное обеспечение для сбора данных статического зондирования. Вывод на экран «опережающей» кривой длительной прочности осуществляется в режиме реального времени.

Это позволяет в полевых условиях:

- получить подтверждение, что тест на релаксацию напряжения достиг необходимого и достаточного времени испытания, которое фиксируется началом горизонтального участка «опережающей» кривой;
- оценить качество выполняемого испытания и при необходимости переделать испытание;
- получить первичную информацию о прочностных характеристиках исследуемых грунтов и при необходимости скорректировать количество испытаний.

На Рисунок 3 представлен пример «опережающей» кривой длительной прочности на сжатие мерзлого грунта.



Рисунок 3 — Пример «опережающей» кривой релаксации лобового сопротивления в полевых условиях по разработанной методике

Разработанный алгоритм представления данных и обработки «хвоста» экспериментальной кривой, внедренный в программное обеспечение, позволяет точно установить значение длительной прочности мерзлого грунта в массиве в данной точке в режиме зондирования со стабилизацией на заданной глубине. Ежесекундное выполнение расчетного алгоритма позволяет точно установить начало II участка кривой релаксации напряжения для каждой точки испытания в

режиме стабилизации и получить индивидуальную кривую длительной прочности мерзлого грунта. Для данных, полученных с помощью датчика лобового сопротивления зонда — это длительная прочность грунта на сжатие ( $\sigma_c$ ), а для данных, полученных с помощью датчика трения грунта по боковой поверхности зонда — это величина длительной прочности на сдвиг ( $\sigma_s$ ).

## Глава 5. Опытная проверка разработанной методики

Опытная проверка разработанной методики проводилась на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, в районе городов Салехард и Лабытнанги. Согласно литературным данным В.М. Сергеева, В.Т. Трофимова, Э.Д. Ершова, Л.И. Зылевой, А.Л. Коновалова. Изучаемый район приурочен к области прерывистого распространения мерзлых грунтов. В районе г. Салехард разрез слагают породы терригенной формации неоген-четвертичного возраста. Они представлены образованиями морского и континентального генезиса. Наибольшим распространением пользуются четвертичные отложения аллювиально-озерного и аллювиально-морского генезиса песчано-глинистого состава различной мощности.

Испытания мерзлых грунтов статическим зондированием, в том числе, для проверки разработанной методики выполнялись в период с 2014 по 2019 гг. на шести площадках, всего было выполнено и обработано около 1500 п.м. статического зондирования мерзлых грунтов.

Для грунтов на площадках исследований оценивались средние значения  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  длительной прочности. Выполнено сравнение полученных данных с рекомендуемыми значениями давления под нижним концом свай (R) и сопротивлением грунта по поверхности смерзания ( $R_{af}$ ), приведенными в таблицах В.1 и В.3 СП 25.13330.2012. Полученные результаты представлены в Таблица 2.

Анализ полученных результатов выявил следующее:

1. В суглинках с увеличением льдистости значения рассчитанных сопротивлений  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  снижаются (столбец 8 и 10).
2. В песках с увеличением дисперсности значения рассчитанных сопротивлений  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  уменьшаются (столбец 8 и 10).
3. Для всех рассмотренных типов грунтов значения  $\sigma_c$  превышают рекомендованные значения давления под нижним концом свай R.
4. Для супесей нельдистых и песков слабольдистых средней крупности значения  $\sigma_s$  превышают рекомендованные  $R_{af}$ . Для суглинков слабольдистых и льдистых, а также песков слабольдистых пылеватых значения  $\sigma_s$  ниже рекомендованных  $R_{af}$ .

**Таблица 2 — Сравнение опытных значений длительной прочности песчаных и глинистых грунтов на сжатие и сдвиг с рекомендованными значениями R и  $R_{af}$  в СП 25.13330.2012 (составлено автором)**

Тип грунта		Кол-во замеров	Температура грунта, °C		Глубина замера, м		$\sigma_c$ , кПа	R, кПа	$\sigma_s$ , кПа	$R_{af}$ , кПа
			от	до	от	до				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Суглинок	нельдистый	21	-0,66	-0,33	19,5	50,5	2430	900-1100	69	40-100
	слабольдистый	34	-0,70	-0,18	9,5	25,5	1335	800-950	35	40-100
	льдистый	17	-0,36	-0,20	5,4	7,5	707	400-550	19	40-60
Супесь	нельдистая	5	-0,41	-0,15	8,0	19,4	2228	750-1050	114	40-60
	слабольдистая	19	-0,50	-0,12	9,5	32,0	2179	850-1050	53	40-60
Песок	слабольдистый пылеватый	14	-0,60	-0,25	10,0	21,5	1963	1000-1800	23	50-130
	слабольдистый мелкий	32	-0,45	-0,12	9,5	25,4	4584	1000-1700	63	50-80
	слабольдистый средней крупности	24	-0,16	-0,12	15,4	25,6	6977	1500	171	50

Полученные результаты не противоречат теоретическим основам механики мерзлых грунтов и накопленному опыту испытаний несущей способности свай в мерзлых грунтах, обобщенному в СП 25.13330.2012.

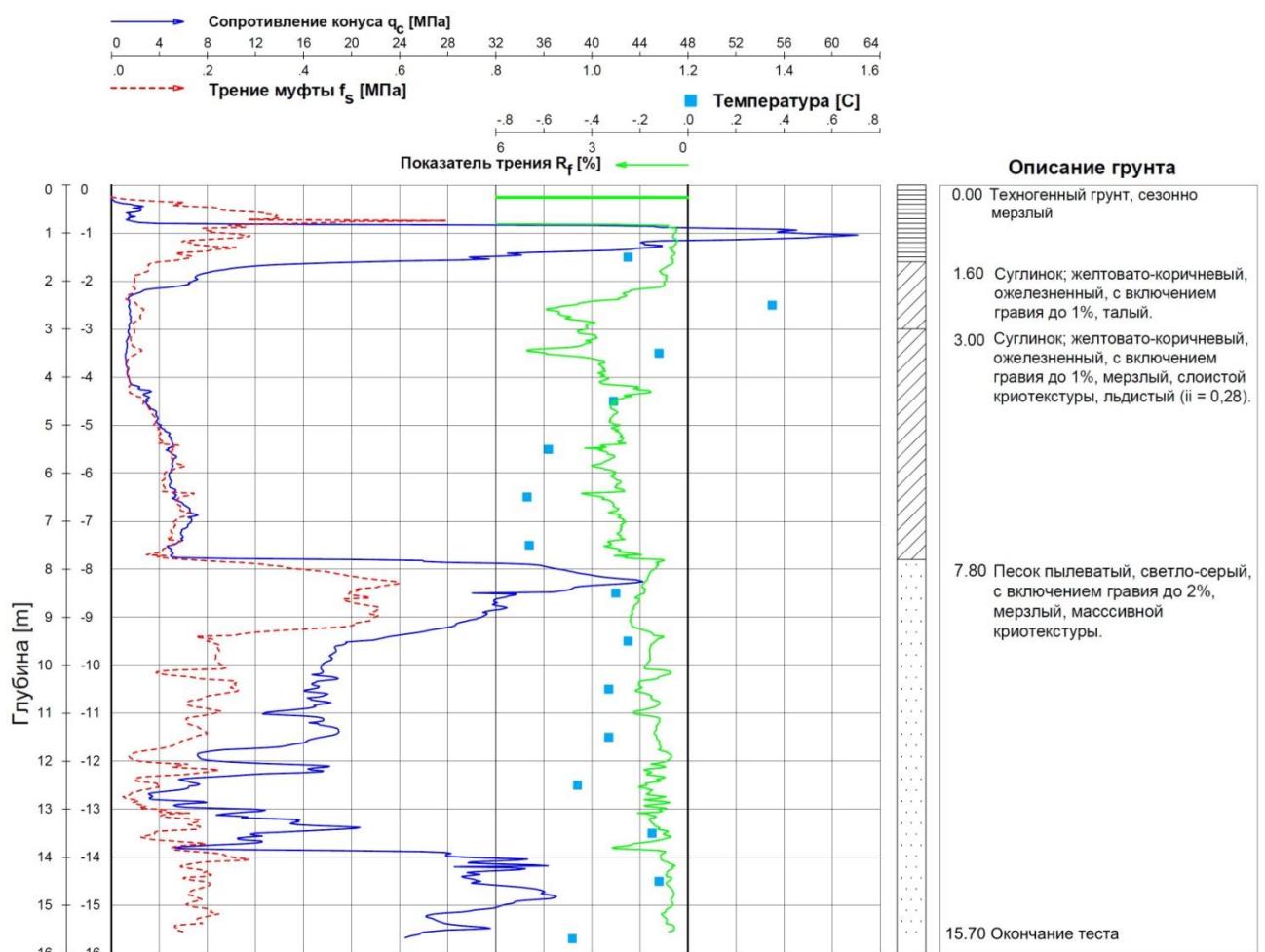
Для проверки разработанной методики определения длительной прочности по данным статического зондирования была выбрана площадка исследований на территории г. Салехард (Рисунок 4), на которой были выполнены испытания натурной сваи статической нагрузкой. Вблизи испытанной сваи было проведено статическое зондирование в соответствии с разработанной методикой на расстоянии 2–3 м от испытанной натурной сваи.

Замеры температуры мерзлых грунтов проводились с помощью статического зондирования и подтвердили наличие мерзлых грунтов на исследуемой площадке. Зондирование было выполнено до глубины 15,7 м с замерами температуры и релаксации напряжения через 1 м. На момент проведения испытаний глубина промерзания составила 1,6 м. Ниже, с глубины 3,0 м залегают многолетнемерзлые грунты. Измеренные температуры в толще мерзлого грунта варьируют от -0,67°C до -0,12°C. Верхняя часть толщи мерзлых грунтов в интервале 3,0–7,8 м представлена суглинками льдистые, ниже, в интервале 7,8–15,7 м залегают пески пылеватые.

Была поставлена задача сравнения получаемых результатов расчета несущей способности свай в мерзлом грунте по данным статического зондирования с фактическими данными по несущей способности натурных сваи.

Испытание проводилось на железобетонной свае квадратного сечения 300x300 мм. Глубина погружения сваи составила 10,6 м. Способ погружения сваи — буровзабивной, диаметр лидерной скважины — 290 мм. Натурное испытание сваи статической вдавливающей нагрузкой проводилось в соответствии с ГОСТ 5686-2012. По данным испытаний последняя ступень нагрузки на сваю, при

которой сохраняется затухающий характер осадки составила  $F_h = 55$  тс. Нагрузка, при которой начала развиваться прогрессирующая осадка, составила  $F_h = 60$  тс.



**Рисунок 4 — Литологическая колонка четвертичных отложений в г. Салехард, совмещенная с графиком статического зондирования**

Далее по методике ГОСТ 20522-2012 рассчитывались значения предельно-длительной несущей способности, которое составило  $F_{hn} = 35,75$  тс.

Расчет несущей способности свай по данным статического зондирования базируется на обработке, описанными уравнениями длительной прочности, записей данных зондирования в режиме стабилизации для любых заданных интервалов времени. Расчет основан на последовательном суммировании значений лобового сопротивления и бокового трения по предложенной формуле:

$$F_{ui} = R_c \cdot A + \sum R_{afc,i} \cdot A_{af,i}, \quad (4)$$

где  $R_c = \sigma_c$  — среднее значение прочности грунта на сжатие, полученное путем осреднения значений на один диаметр выше и четыре диаметра ниже наконечника зонда;  $A$  — площадь поперечного сечения сваи;  $R_{afc,i} = \sigma_s$  — прочность грунта на сдвиг;  $A_{af,i}$  — площадь поверхности смерзания  $i$ -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи,  $\text{м}^2$ . Порядок расчета сходный с методикой СП 25.13330.2012, однако в нем отсутствуют поправочные и эмпирические коэффициенты. Основой расчета служат полученные значения длительной прочности грунта. Расчет

производится для полученных значений  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  каждого замера релаксации напряжения на испытуемых глубинах. Интервал времени был выбран исходя из времени испытания сваи – 10 дней, а для оценки предельно-длительной несущей способности сваи – 100 лет в целях расчетов проектирования.

Сравнительный анализ результатов показал (Рисунок 5), что для расчета несущей способности сваи на 10 дней  $F_u=66$  т, что дает хорошее совпадение с результатами натурного испытания несущей способности сваи по ГОСТ 5686-2012, в ходе которого производилась ступенчатая нагрузка в течение 10 дней, и при нагрузке в 60 т (на 10-й день) наблюдалась незатухающая деформация.

При сравнении результатов расчета по двум методикам значения несущей способности под острием сваи близки: 35 т по СП 25.13330.2012 и 29 т по разработанной методике. Существенное отличие между результатами расчета по методикам СП 25.13330.2012 и разработанной методики заключается в значениях несущей способности по боковой поверхности сваи: 90 т и 12 т соответственно, т.е. более чем в 7 раз.



Рисунок 5 — Схема сопоставления результатов расчета несущей способности свай

Причиной завышения получаемого значения несущей способности по методике СП 25.13330.2012 является порядок расчета сопротивления по боковой поверхности сваи. В расчет берется не скоростное ( $f_{sv}$ ) или стабилизированное ( $f_{ss}$ ) значения бокового трения муфты зонда, а значение ( $f_{si}$ ) удельного сопротивления вдоль боковой поверхности муфты трения, замеренное в начальный момент дополнительного давливания зонда после завершения его вмерзания в грунт в процессе испытания в режиме «стабилизации». В свою очередь, авторами Приложения Л СП 25.13330.2012, О.Н. Исаевым и др., в 1987 г. было отмечено, что определение предельного сопротивления мерзлого грунта вдоль боковой поверхности сваи («боковое» сопротивление) с использованием статического зондирования представляет собой весьма сложную задачу и изучено недостаточно.

Полученные на площадке результаты сравнительных исследований на территории г. Салехард, показывают, что значения несущей способности забивной сваи, рассчитанные с помощью разработанной методики гораздо ближе к результатам натурного испытания сваи статической нагрузкой, чем рассчитанные по методике, изложенной в СП 25.13330.2012 Приложение Л.

## **Глава 6. Примеры практического применения статического зондирования в мерзлых грунтах для решения инженерных задач**

За время сбора полевых данных и проведения полевых испытаний автором были накоплены примеры применения статического зондирования для решения задач проектирования оснований зданий и сооружений в зоне распространения мерзлых грунтов, подходы к режимным наблюдениям за состоянием мерзлых грунтов в зоне инженерно-строительной деятельности человека, а также предложена методика прогноза изменения состояния мерзлых грунтов основания сооружения с помощью периодических испытаний грунтов статических зондированиям.

**Оценка эффективности работы термостабилизаторов** по данным статического зондирования была реализована в рамках дополнительных работ при инженерно-геокриологических изысканиях и диагностике состояния грунтового основания под зданием Ямальского полярного аграрного агрекономического техникума. Здание техникума построено в 1977 г., имеет свайный фундамент и проветриваемое подполье высотой 2 м. Проектом были предусмотрены сваи длиной 8–10 м, объединенные железобетонным сплошным ростверком. В 2015 г. для поддержания температурного режима грунтов основания напротив каждой сваи были смонтированы алюминиевые термостабилизаторы длиной 8 м и диаметром 25 мм. К моменту выполнения статического зондирования (декабрь 2016 г.) термостабилизаторы отработали 1 полный зимний цикл. Для оценки эффективности работы термостабилизаторов зондирование проводилось на глубину, превышающую длину их испарителя (8 м), в частности до 11,5 и 12,1 м. Точки статического зондирования располагались в зоне теплового влияния термостабилизаторов (на расстоянии 0,7 м и 1,0 м) и вне зоны теплового влияния (2,1 м). Результаты температурных замеров зафиксировали:

- минимальное снижение температуры грунта  $-0,86^{\circ}\text{C}$  на глубине 6 м;
- рабочее состояние термостабилизаторов;
- «пассивную» часть испарителя (начиная с глубины 6 м, охлаждающее воздействие термостабилизаторов быстро снижается).

Расчет несущей способности сваи по разработанной методике и по методике СП показал, что при снижении температуры грунтового массива вокруг термостабилизатора на  $-0,5$  –  $-0,8^{\circ}\text{C}$ , на 10–30% возросла несущая способность сваи.

**Диагностика состояния грунтового основания железной дороги** на многолетнемерзлых грунтах статическим зондированием позволяет за короткие сроки провести оценку свойств грунтов, что особенно важно при работе на действующих транспортных или режимных объектах, где длительная приостановка технологического процесса ведет к значительным трудностям или невозможна. Для проведения испытаний был выбран участок Северной железной дороги близ станции Полярный Урал, на котором длительное время фиксировались неравномерные осадки земляного полотна насыпи, что приводило к снижению пропускной способности участка железной дороги. Железнодорожная насыпь в месте работ варьирует по мощности от 2 до 6 м от поверхности естественного грунта. По обеим сторонам насыпи железной дороги наблюдаются проявления термокарста и заболоченности в виде небольших озер и низменностей. Поверхностные и подземные воды свободно протекают через железнодорожную насыпь, особенно вблизи водопропускной трубы. Геодезическая съемка показала, что общая осадка насыпи железнодорожного полотна составила 62 см. Бурение скважин на действующей железной дороге невозможно, поскольку технологическое окно между проходящими поездами составляет максимум 3 часа. Съемка наземным георадаром не позволила обнаружить кровлю мерзлых грунтов, показав только оттаявшие слои насыпи до отметки 4 м. Статическое зондирование в такой ситуации является единственным методом, позволяющим оценить свойства грунта в массиве, замерить температуру, провести расчленение разреза по глубине. Результаты проведенного статического зондирования показали, что причина осадок вызвана не изменениями радиационно-теплового режима в насыпи железной дороги, а самой балластной подсыпкой насыпи (ее мощностью и весом) в совокупности с высокими динамическими нагрузками на мерзлые грунты, которые находятся при температуре близкой к температуре начала замерзания, имеют высокую льдистость и в полной мере проявляют реологические свойства.

**Инженерно-геокриологический мониторинг за состоянием мерзлых грунтов** оснований инженерных сооружений возможно выполнять с помощью статического зондирования. Большинство инженерных сооружений на мерзлых грунтах построено на свайных основаниях.

Существующие методы инженерно-геокриологического мониторинга инженерных сооружений на мерзлых грунтах делятся на три группы: а) геодезический; б) структурный; в) температурный. Главный недостаток перечисленных групп методов — это отсутствие возможности диагностировать потерю несущей способности свай на начальном этапе, спрогнозировать тренд потери несущей способности до начала развития деформации основания и определить подходящие и обоснованные меры и решения по инженерной защите.

Для выявления процесса снижения несущей способности свайного основания предлагается проведение режимных испытаний мерзлого грунтового основания

статическим зондированием в заранее установленных точках, начиная со стадии инженерно-геокриологических изысканий и далее в процессе строительства и эксплуатации инженерного сооружения. Периодичность испытаний может быть установлена один раз в год, в три года или пять лет, в зависимости от инженерно-геокриологических условий площадки. Получаемые результаты сравниваются с результатами предыдущих испытаний и оценивается динамика изменения оцениваемых параметров (температура, засоленность, прочностные характеристики, несущая способность свай и др.). Если один из параметров последовательно (устойчиво) изменяется, тогда анализируется тренд и рассматриваются меры по инженерной защите.

Автором предлагается рассматривать и классифицировать состояния мерзлого грунтового основания по отношению к свайным фундаментам на следующие четыре стадии:

1. *Нормальное состояние мерзлого грунтового основания* – проектная несущая способность свай соответствует (не ниже) фактической несущей способности, что превышает нагрузку, передаваемую от сооружения на сваю.

2. *Ослабленное состояние мерзлого грунтового основания* – фактическая несущая способность свай меньше проектной, но все еще превышает нагрузку, передаваемую от сооружения на сваю.

3. *Слабое состояние мерзлого грунтового основания* – фактическая несущая способность свай равна нагрузке, передаваемой от сооружения, а избыточные нагрузки начинают перераспределяться на соседние сваи с относительно большей несущей способностью. Перераспределение нагрузок препятствует разрушению инженерного сооружения, однако, небольшие нарушения (трещины) могут образовываться и быть видимыми.

4. *Аварийное состояние мерзлого грунтового основания* – фактическая несущая способность свай меньше нагрузки, передаваемой от сооружения. В этом случае наблюдаются осадка инженерного сооружения, а значительные деформации и разрушения приводят к нарушению целостности инженерного сооружения и, как правило, прекращению его эксплуатации.

Таким образом, статическое зондирование – единственный метод, позволяющий диагностировать состояние мерзлого основания на второй стадии и предпринять своевременно требуемые меры инженерной защиты наблюдаемых мерзлых грунтовых оснований.

## Заключение

1. Выполнено обоснование применения статического зондирования для измерения температуры мерзлых грунтов, удовлетворяющее нормативным требованиям к полевым измерениям температуры. Разработана экспресс-методика измерения температуры грунта статическим зондированием. Показано хорошее

совпадение между значениями температуры, полученными при помощи статического зондирования и скважинной термометрией.

2. Разработанная методика обработки «хвоста» кривой релаксации напряжений позволяет точно и однозначно рассчитать значения коэффициентов уравнения длительной прочности мерзлого грунта на сжатие и сдвиг. Применение статического зондирования со стабилизацией для мерзлых грунтов длительностью первые десятки минут достаточно для определения их длительной прочности на сжатие и на сдвиг.

3. Разработанное приложение к программе сбора полевых данных позволяет измерить длительную прочность построением «опережающей» кривой длительной прочности и устанавливает начало II участка кривой релаксации напряжения в полевых условиях.

4. В ходе опытной проверки разработанной методики выполнено сравнение значений несущей способности сваи, полученных по результатам полевого испытания статической вдавливающей нагрузкой с результатами расчета по методике СП 25.13330.2012. Сравнение показало, что расчет по СП 25.13330.2012 дает существенно более высокие значения несущей способности, особенно в части бокового трения поверхности сваи о грунт. Применение разработанной автором методики позволяет выполнить расчеты несущей способности сваи без использования эмпирических коэффициентов и получить результаты, которые хорошо совпадают с данными испытаний натурных свай статической вдавливающей нагрузкой.

5. На основе разработанной автором методики оценены показатели прочностных свойств некоторых характерных типов многолетнемерзлых грунтов, изученных около городов Салехард, Лабытнанги и Новый Уренгой. Сравнение результатов с рекомендованными значениями соответствующих показателей в СП 25.13330.2012 показало, что для всех рассмотренных типов грунтов значения  $\sigma_c$  превышают рекомендованные значения давления под нижним концом сваи  $R$ . Для супесей нельдистых и песков слабольдистых средней крупности значения  $\sigma_s$  превышают рекомендованные  $R_{af}$ . Для суглинков слабольдистых и льдистых, а также песков слабольдистых пылеватых значения  $\sigma_s$  ниже рекомендованных  $R_{af}$ .

6. Разработан подход к проведению инженерно-геокриологического мониторинга мерзлых грунтовых оснований, позволяющий диагностировать состояние мерзлого основания на стадии II, предложенной классификации и предпринять своевременно требуемые меры инженерной защиты наблюдаемых мерзлых грунтовых оснований. Подход основан на сравнении получаемых результатов статического зондирования в одной точке с результатами предыдущих испытаний.

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение», опубликованные автором по теме диссертации:**

1. Волков, Н.Г., Соколов, И.С. Сравнение температурных замеров грунтов с помощью статического зондирования и скважинной / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Инженерные изыскания. – 2018. – № 7–8. – С. 16–24. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,294.
2. Тюрин, А.И., Исаев, В.С., Сергеев, Д.О., Тумской, В.Е., Волков, Н.Г., Соколов, И.С., Комаров, О.И., Кошурников, А.В., Гунар, А.Ю., Комаров, И.А., Ананьев, В.В. Совершенствование полевых методов инженерно-геокриологических исследований / А.И. Тюрин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2019. – № 1. – С. 104–116. Импакт-фактор журнала в РИНЦ 2018: 0,573.
3. 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. Импакт-фактор журнала в РИНЦ 2013: 0,153.

**Публикации в иных научных изданиях:**

1. Sokolov, I.S. [and etc.] Cone Penetration Testing for Railways on Permafrost / I.S. Sokolov [and etc.] // Proceedings XI International Conference on Permafrost. – 2016. – pp. 1144–1145.
2. Volkov, N., Sokolov, I., and Jewell, R. Investigation by Cone Penetration Tests of Piled Foundations in Frozen Soil Maintained by Thermosyphons / N. Volkov [and etc.] // American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences. – 2017. – Vol. 31, No. 1. – pp. 40–58.
3. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. Cone penetration testing of permafrost soils / N. Volkov [and etc.] // Proceedings 5th European Conference on Permafrost. – 2018. – pp. 215–216.
4. Volkov, N., Sokolov, I., Jewell, R. CPT Testing in Permafrost. Proceedings 4th International Symposium on Cone Penetration Testing / N. Volkov [and etc.] // – CPT’18. – Netherlands, Delft – 2018. – pp. 1258–1268.
5. 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.

6. Волков, Н.Г., Соколов, И.С. Геотехнический мониторинг мерзлого грунтового основания с помощью статического зондирования / Н.Г. Волков, И.С. Соколов // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 5. – С. 52–59. Показатели цитирования: SJR 2008: 0,100; РИНЦ 2018: 0,667.
7. Tyurin, A.I., Isaev, V.S., Sergeev, D.O., Tumskoi, V.E., Volkov, N.G., Sokolov, I.S., Komarov, O.I., Koshurnikov, A.V., Gunar, A.Yu., Komarov, I.A., and Anan'ev, V.V. Improvement of field methods for engineering geocryological surveying / A.I. Tyurin [and etc.] // Moscow University Geology Bulletin. – 2019. – No. 74(3). - pp. 70 –82.
8. Соколов, И.С. Диагностика с помощью статического зондирования мерзлого грунтового основания, охлажденного термостабилизаторами / И.С. Соколов // Научный вестник Ямало-ненецкого автономного округа – устойчивое развитие Арктики. – 2019. – № 1 (102) – С. 65–73.