

На правах рукописи

Шихов Александр Игоревич



**МЕТОД ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ
ГРУНТАХ, ОСНОВАННЫЙ НА СОВМЕСТНОМ
ПРИМЕНЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ И
АКУСТИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

*Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Сясько Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Сахаров Игорь Игоревич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра геотехники, профессор;

Быченков Владимир Анатольевич

кандидат технических наук, учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», заместитель директора по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам;

Ведущая организация – закрытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «СПЕКТР», г. Москва.

Защита диссертации состоится 24 мая 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 марта 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Значительная часть территории Российской Федерации расположена в зоне распространения вечномерзлых грунтов. Здания и сооружения, возведенные по принципу I, то есть с сохранением мерзлого состояния грунтов, как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации сооружения чувствительны к изменению температурного режима основания. Результаты проведенных мониторинговых наблюдений за температурой атмосферного воздуха и температурой грунтов в криолитозоне РФ показывают, что тренды повышения температуры имеют устойчивый рост. Изменение климата оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства вечномерзлых оснований сооружений, однако мнение об их преимущественном влиянии на участвовавшие аварийные ситуации представляется неоднозначным.

В сложившейся ситуации определяющую роль в обеспечении безаварийной эксплуатации зданий и сооружений выполняет геотехнический мониторинг. Проведение геотехнического мониторинга оснований зданий и сооружений, расположенных в зоне распространения вечномерзлых грунтов, является обязательным и регламентируется нормативными документами. В настоящее время существует значительное количество методов и средств геотехнического мониторинга, позволяющих в непрерывном режиме получать данные о состоянии оснований зданий и сооружений, однако количество аварийных ситуаций, связанных с оттаиванием вечномерзлых грунтов, за последние годы существенно увеличилось. Основными методами геотехнического мониторинга являются температурный и геодезический. Но ни один из них не позволяет непосредственно контролировать изменение деформационных характеристик вечномерзлых грунтов, несмотря на то, что данные характеристики грунтов являются основными при проектировании оснований сооружений. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что обоснование и разработка метода геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах является актуальным направлением науки и практики.

Степень разработанности темы исследования

В работах А.В. Брушкова, А.А. Васильева, В.Н. Конищева, А.А. Израэля, А.И. Бедрицкого, Г.В. Груза, О.А. Анисимова, Н.Г. Обермана рассматриваются изменение климата и реакция криолитозоны на потепление. Изучению деформационных характеристик грунтов посвящены труды С.С. Вялова, М.Н. Гольдштейна, И.М. Горькова, Р.С. Зиангирова, В.А. Королева, Л.И. Кульчицкого, Н.Н. Маслова, С.Р. Месчан, Н.В. Орнатского, В.И. Осипова, И.В. Попова, Н.П. Пузыревского, Н.А. Цытовича, Е.А. Вознесенского. Методы проведения геотехнического мониторинга подробно описаны в работах Д.В. Буркова, С.Н. Стрижкова, Н.А. Макарского, Сахарова И.И., А.В. Дроздова, В.В. Неклюдова, Д.С. Паздерина, Э.Д. Ершова, Б.Н. Достовалова. Применению методов акустического вида неразрушающего контроля для изучения грунтов посвящены работы: Н.Н. Горяйнова, Ф.М. Ляховицкого, А.И. Потапова, И.В. Павлова, И.И. Сахарова, В.Н. Никитина, А.И. Савича, З.Г. Яценко, М.Л. Влагова, В.С. Зинченко, В.В. Ильченко, В.И. Бондарева, Т.Б. Соколовой, А.А. Булычева, И.В. Лыгина. Работы В.Н. Никитина, А.И. Савича, В.В. Калинина, М.Л. Влагова, В.Е. Василевского, И.Г. Минделя посвящены установлению зависимости между модулем общей деформации и динамическим модулем упругости скальных пород и глинистых грунтов. В работах представленных авторов не рассматривается возможность проведения геотехнического мониторинга вечномёрзлых грунтов с применением активной группы акустических методов контроля.

В настоящее время имеются разнообразные конфигурации оборудования и методики геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах. Несмотря на наличие большого количества работ по данной тематике, проблема геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах, в данный момент не решена. Поэтому обоснование и разработка метода геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах является важной научно-технической задачей, особенно в условиях деградации криолитозоны и сокращения территорий с пригодными для ее существования условиями.

Цель и задачи

Обоснование и разработка метода геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, основанного на временном методе акустического вида неразрушающего контроля, позволяющего непосредственно контролировать изменение деформационных и прочностных характеристик оснований сооружений.

Для реализации поставленной цели в диссертации были решены следующие **задачи**:

1. Анализ опубликованных работ, посвященных проведению геотехнического мониторинга и применению акустического вида неразрушающего контроля для изучения деформационных характеристик грунтов.

2. Теоретическое обоснование метода геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

3. Разработка методик проведения экспериментальных исследований.

4. Разработка методик подготовки модельных образцов мерзлых дисперсных грунтов нарушенного сложения.

5. Исследование акустических характеристик модельных образцов мерзлых дисперсных грунтов при оттаивании временным методом акустического контроля.

6. Исследование взаимосвязи акустических, деформационных и прочностных характеристик грунтов на модельных образцах мерзлых дисперсных грунтов при оттаивании.

7. Разработка системы геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

8. Разработка метрологического обеспечения системы геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

Идея работы

Получение данных о деформационных и прочностных характеристиках оснований сооружений на вечномерзлых грунтах временным методом акустического вида неразрушающего контроля и переход от упругих характеристик к упругопластическим характеристикам грунтов по установленной корреляционной

зависимости между динамическим модулем упругости и модулем общей деформации грунтов.

Научная новизна

1. Разработана цифровая модель, основанная на деформационной теории пластичности, позволяющая оценить состояние основания сооружения по второй группе предельных состояний по результатам контроля акустических характеристик грунтов.

2. Получены и теоретически обоснованы экспериментальные зависимости соотношения динамического модуля упругости и модуля общей деформации грунтов, определяемого по результатам испытаний грунтов методом одноосного сжатия.

3. Разработан проект метрологического обеспечения системы геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Обоснована и разработана система геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах, основанная на совместном применении временного метода акустического вида неразрушающего контроля и метода испытаний грунтов радиальным прессиометром, позволяющая определять модуль общей деформации грунтов по результатам продольно-поперечного акустического прозвучивания на всем этапе эксплуатации сооружения и с учетом напряженно-деформируемого состояния основания оценивать основание по второй группе предельных состояний.

2. Разработан проект методики геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах.

3. Разработан проект методики создания стандартных образцов мерзлого песка, для которых получены значения скорости распространения продольной волны и модуля общей деформации.

Методология и методы исследований

Определение физических свойств модельных грунтов проводилось с помощью лабораторных методов, широко используемых в инженерной геологии. Исследование акустических

характеристик модельных образцов мерзлых грунтов при оттаивании проводилось с помощью ультразвукового прибора Пульсар-2.2. Изучение взаимосвязи акустических характеристик с деформационными и прочностными характеристиками грунтов проводилось в условиях одноосного сжатия на электромеханической универсальной испытательной машине Insight 200. Все исследования проводились на базе Санкт-Петербургского горного университета.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полученные зависимости и разработанные модели, связывающие скорость распространения продольных упругих колебаний и физико-механические параметры грунтов, позволяют оценить момент перехода вечномерзлого грунта из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние.

2. Использование установленной корреляционной зависимости между динамическим модулем упругости и модулем общей деформации грунтов, и разработанной цифровой модели, основанной на деформационной теории пластичности, позволяет выполнить оценку основания сооружения по второй группе предельных состояний.

Степень достоверности результатов исследования

- Защищаемые положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, соответствуют классическим положениям приборостроения, механики грунтов и основам математического моделирования.

- Лабораторные исследования проведены в достаточном объеме.

- При выполнении лабораторных исследований использовалось современное, поверенное оборудование, которое обеспечивало высокую точность полученных результатов.

Апробация результатов

Основные положения, результаты работы в целом и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XI Международной научной конференции «Наука России: цели и задачи» (Екатеринбург, 2018), V Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы

развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME 2018» (Санкт-Петербург, 2018), XIV Международной научной конференции «Наука России: цели и задачи» (Екатеринбург, 2019), VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME 2020» (Санкт-Петербург, 2020), XXXII Уральской конференции с международным участием «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (Екатеринбург, 2020).

Личный вклад автора

Работа является результатом проведенных исследований в период обучения автора в очной аспирантуре на кафедре метрологии, приборостроения и управления качеством механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета. Автором были подготовлены модельные образцы мерзлого песка, для каждого образца были определены физические свойства, акустические и деформационные характеристики в твердомерзлом и пластичномерзлом состоянии. В условиях одноосного сжатия проведены ультразвуковые исследования. Предложена цифровая модель для расчета результатов проведения геотехнического мониторинга.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 126 наименований, и двух приложений. Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 8 таблиц.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность доктору технических наук, профессору Анатолию Ивановичу Потапову за помощь в подготовке и проведении научных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность работы, цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследования.

В первой главе представлена информация о современном состоянии криолитозоны. Проведен анализ основных типов фундаментов, применяемых в условиях вечной мерзлоты. Рассмотрены факторы, влияющие на деформационные характеристики вечномерзлых грунтов. Проведенный анализ показал, что деформационные характеристики вечномерзлых грунтов зависят от различных факторов, таких как гранулометрический состав, льдистость, температура грунтов и т.д., но главным фактором является количество незамерзшей воды.

Анализ основных методов геотехнического мониторинга, применяемых в настоящее время, показал, что при проведении геотехнического мониторинга основной упор делается на контроль температуры грунтов и планово-высотных отметок геодезической сети. Однако, по нашему мнению, температура замерзания грунтов не является константой, и может изменяться в процессе эксплуатации сооружения, тем более в условиях активации геокриологических процессов.

Проведенный анализ процесса промерзания-оттаивания грунтов подтвердил предположение о возможных изменениях температуры замерзания грунтов в период эксплуатации сооружения.

В первой главе проведен анализ применяемых для изучения грунтов акустических методов, который показал наличие взаимосвязи характеристик упругих волн с физико-механическими свойствами грунтов.

Во второй главе выполнено теоретическое обоснование возможности применения временного метода акустического вида неразрушающего контроля для проведения геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

Упругие свойства грунтов связаны с характеристиками упругой волны следующим образом (1):

$$E = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}, \quad (1)$$

где V_p – скорость продольной волны; ρ – плотность грунта; E – динамический модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

С другой стороны, согласно закону Гука, динамический модуль упругости равен (2):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{упр}}. \quad (2)$$

Очевидно, что напряжения, возникающие в грунтах от воздействия сооружения, постоянные. Тогда (3):

$$\varepsilon_m < \varepsilon_{от}, \text{ при } \sigma = \text{const}; \quad (3)$$

Следовательно, справедливо и следующее неравенство (4):

$$E_m > E_{от}, \text{ при } \sigma = \text{const}; \quad (4)$$

где ε_m , E_m – относительная линейная деформация и динамический модуль упругости мерзлого грунта; $\varepsilon_{от}$, $E_{от}$ – относительная линейная деформация и динамический модуль упругости оттаявшего грунта; $\varepsilon_{упр}$ – упругая относительная деформация.

Как можно видеть из выражения (1) V_p зависят от E , тогда из неравенства (4) следует (5):

$$V_p^m > V_p^{от}, \quad (5)$$

где $V_p^m, V_p^{от}$ – скорость продольной волны в мерзлом и оттаявшем грунте соответственно.

Этот факт делает возможным применение акустического вида неразрушающего контроля для решения задач геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах. Однако, как было сказано выше, упругие характеристики продольной волны связаны с упругими характеристиками грунтов, но основания сооружений работают в упругопластическом диапазоне нагрузок.

Параметром, характеризующим деформационные свойства грунтов, является модуль общей деформации (6), (7):

$$E_o = \frac{\sigma}{\varepsilon_{общ}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{общ} = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл}, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{общ}$ – общая относительная линейная деформация; $\varepsilon_{пл}$ – пластическая (необратимая) относительная линейная деформация.

Из выражений (2), (6) и (7) можно сделать вывод (8):

$$E_o < E. \quad (8)$$

Следовательно, оценка изменений деформационных свойств по результатам акустических испытаний невозможна, так как результаты будут значительно завышены. В то же время E , как и E_o , характеризуют способность грунтов сопротивляться деформированию. Данные величины характеризуют различные стадии деформирования грунтов и разница между значениями этих характеристик обусловлена только диапазоном нагрузок, при котором они определяются.

Для оценки деформационных свойств грунтов предлагается предварительно устанавливать корреляционную зависимость, которая имеет следующий вид (9):

$$E_o = bE_o + a. \quad (9)$$

Установление данной корреляционной зависимости позволит получить значение E_o по результатам акустических испытаний грунтов.

Кроме теоретического обоснования возможности применения временного метода акустического вида неразрушающего контроля для проведения геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, во второй главе предложена цифровая модель, основанная на деформационной теории пластичности, позволяющая с применением метода конечных элементов оценить основание сооружения по второй группе предельных состояний.

Для системы «Свайный фундамент – вечномерзлый грунт» характерно наличие трех зон с различным напряженно – деформируемым состоянием (рисунок 1).

Для расчета осадки основания предлагается рассматривать каждую зону отдельно, тогда общая осадка основания будет равна (10):

$$S = S_3 + S_2 + S_1; \quad (10)$$

где S_3 – деформация зоны компрессионного сжатия грунтов; S_2 – деформация зоны вмерзания сваи в грунт; S_1 – деформация зоны сезонно талого слоя.

Согласно деформационной теории пластичности напряжения и деформации связаны следующим образом (11):

$$\{\sigma\} = [D_{yn}] \cdot \{\varepsilon\}; \quad (11)$$

где $\{\sigma\}$ – тензор напряжений; $\{\varepsilon\}$ – тензор деформаций; $[D_{yn}]$ – упругопластическая матрица.

$$[D_{yn}] = \frac{E_o}{(1-2\mu)(1+\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1-\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-2\mu)/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-2\mu)/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-2\mu)/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

симм

Так как E_o зависит от величины напряжения и не является константой в отличие от E , то зависимость (9) устанавливается для каждого i -го конечного элемента (13):

$$E_{oi} \equiv E_o(\sigma_1), \quad (13)$$

где σ_1 – величина главного нормального напряжения в данной точке массива грунтов.

После проведения измерений времени распространения продольной волны в грунте рассчитывается E по выражению (1), далее рассчитывается E_o для i -го конечного элемента, по выражению (9).

После вычисления значения относительных деформаций (11) рассчитываются значения узловых перемещений (14):

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}, \quad (14)$$

где $\{\delta\}$ – вектор узловых перемещений; $[B]$ – матрица производных функций формы конечного элемента.

Определив узловые перемещения каждого i -го конечного элемента, получим значение осадки основания (15):

$$S = \sum_{i=1}^n \{\delta\}_i, \quad (15)$$

Критерием удовлетворительного состояния основания является следующее неравенство (16):

$$S \leq S_{\text{ц}}. \quad (16)$$

где $S_{\text{ц}}$ – допустимая величина осадки основания, определяемая СП «Основания зданий и сооружений».

Можно сделать вывод, что совместное применение акустического и инженерно-геологического методов с использованием предложенной цифровой модели позволяет контролировать изменение непосредственно деформационных свойств оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, в отличие от температурного и геодезического методов.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования взаимосвязи деформационных, прочностных и акустических характеристик мерзлых грунтов при их оттаивании. Экспериментальные исследования проводились в два этапа.

На первом этапе были изучены акустические характеристики мерзлых грунтов при оттаивании. В состав установки входят деревянные кубические формы с внутренними размерами 200 x 200 x 200 мм, морозильная камера, ультразвуковой тестер материалов Пульсар-2.2, термopapa и мультиметр. Физические свойства грунтов аналогичны грунтам, распространенным в зоне распространения вечномерзлых грунтов на территории России.

Величина коэффициента корреляции (таблица 1) говорит о высокой степени взаимосвязи температуры грунта и скорости распространения продольной волны.

Состояние грунтов в процессе измерений можно разделить на три этапа, показанные на рисунке 2. Первый этап – (температура грунта от -15 до -10 °C). На этом этапе весь объем грунта находился в твердомерзлом состоянии. Значение скорости распространения продольной волны изменялось незначительно. Второй этап – (температура грунта от -10 до -5 °C). На данном этапе образцы грунта имели участки как пластичномерзлого, так и твердомерзлого состояния. В результате в ходе второго этапа оттаивания мы можем наблюдать резкое снижение величины скорости распространения продольной волны в грунте. На третьем этапе образец оттаивал полностью – (температура грунта от -5 до 0 °C). Состояние образца выравнивалось. В результате изменения величины скорости

распространения продольной волны в грунте на третьем этапе незначительны. Также стоит отметить, что величина скорости распространения продольной волны на всем протяжении процесса оттаивания грунта уменьшалась.

Таким образом, первое научное положение, выносимое на защиту, звучит как:

Полученные зависимости и разработанные модели, связывающие скорость распространения продольных упругих колебаний и физико-механические параметры грунтов, позволяют оценить момент перехода вечномерзлого грунта из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние.

На втором этапе проводилось исследование взаимосвязи акустических, деформационных и прочностных характеристик оснований сооружений на вечномерзлых грунтах. В состав установки входят цилиндрические формы для замораживания грунта высотой 200 мм и диаметром 100 мм, электромеханическая универсальная испытательная машина Insight 200, позволяющая поддерживать требуемую температуру при проведении испытаний образцов грунта на одноосное сжатие, ультразвуковой тестер материалов Пульсар-2.2.

Как было показано выше, при оттаивании грунтов скорость распространения продольной волны в мерзлых грунтах снижается. Очевидно, что при оттаивании грунтов сопротивление сдвигу по боковой поверхности смерзания (зона 2 рисунок 1) также будет снижаться. В рамках данной работы были проведены исследования взаимосвязи акустических и прочностных характеристик оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

Результаты, показанные в таблице 2, подтверждают выводы, сделанные в ходе теоретических исследований о том, что скорость распространения продольной волны и сила сопротивления сдвигу по боковой поверхности смерзания взаимно уменьшаются по мере оттаивания грунтов. Полученное значение коэффициента корреляции $R = 0,95$ свидетельствует о значительной взаимосвязи данных характеристик мерзлых грунтов.

По результатам измерений динамического модуля упругости и модуля общей деформации грунта при температуре -10°C , была получена корреляционная зависимость (17):

$$E_o = 0,013E + 30. \quad (17)$$

Далее, при температурах -3°C и $(-1\div 0)^{\circ}\text{C}$ модуль общей деформации определялся методом испытаний грунтов на одноосное сжатие и по корреляционной зависимости. Результаты измерений показаны в таблице 3.

Как можно видеть по данным, приведенным в таблице 3 отклонение значения модуля общей деформации грунтов, определённого по корреляционной зависимости, не превышает 10%. Стоит заметить, что при температуре грунтов $(-1\div 0)^{\circ}\text{C}$ величина модуля общей деформации уменьшилась на 26 % по отношению к величине модуля общей деформации, определенному при температуре -10°C . Так как нами ставится задача обоснования и разработки метода геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, который позволил бы выявить деградацию основания сооружения на раннем этапе, снижение величины деформационных характеристик грунтов на 26% является критическим. Величина коэффициента корреляция также говорит о высокой степени взаимосвязи деформационных и акустических характеристик грунтов.

Таким образом, второе научное положение, выносимое на защиту, звучит как:

Использование установленной корреляционной зависимости между динамическим модулем упругости и модулем общей деформации грунтов, и разработанной цифровой модели, основанной на деформационной теории пластичности, позволяет выполнить оценку основания сооружения по второй группе предельных состояний.

В четвертой главе представлен разработанный проект методики геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах и система для ее реализации.

Проект методики геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах включает в себя два этапа: подготовительный – бурение скважин, отбор образцов, установка

оборудования, установление $E_o = f(E)$ и $R_{af} = f(V_p)$, и основной – проведение регулярного геотехнического мониторинга. Расположение и количество наблюдательных скважин устанавливаются по аналогии с температурным методом геотехнического мониторинга, глубина скважин определяется, исходя из глубины сжимаемой толщи. Для установки корреляционной зависимости $E_o = f(E)$ совместно применяются временный метод акустического вида неразрушающего контроля и метод испытания грунтов радиальным прессиометром. Корреляционная зависимость $R_{af} = f(V_p)$ устанавливается по результатам проведения испытаний методом среза по поверхности смерзания и акустического прозвучивания грунтов. Для корректировки корреляционной зависимости $E_o = f(E)$ проводятся дополнительные лабораторные испытания грунтов методом компрессионного сжатия и акустического прозвучивания.

Проведение регулярного геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах заключается в послойном акустическом прозвучивании грунта. После проведения полевых акустических испытаний по установленной ранее корреляционной зависимости $E_o = f(E)$ рассчитывается модуль общей деформации грунтов и определяется сопротивление сдвигу по боковой поверхности смерзания R_{af} по построенной ранее кривой $R_{af} = f(V_p)$, далее выполняются расчеты осадки основания по предложенной цифровой модели и оценка основания сооружения по второй группе предельных состояний. Система геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах показана на рисунке 3.

Также в данной главе разработан проект метрологического обеспечения системы геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, показанный на рисунке 5. Предлагается поэлементная калибровка устройства с итоговой верификацией. Итоговая верификация проводится методом прямых измерений на стандартных образцах. Стандартные образцы представляют собой модельные образцы мерзлого песка. При хранении мерзлого песка в морозильной камере может происходить физическое выветривание грунта, следовательно, добиться

повторяемости результатов невозможно. Поэтому предложена методика создания стандартных образцов (рисунок 4), для которых получены значения скорости распространения продольной волны и модуля общей деформации, определенного на установке одноосного сжатия.



Рисунок 4 – Структурная схема методики создания стандартного образца.



Рисунок 5 – Проект метрологического обеспечения системы геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

В заключении представлены выводы по результатам диссертационного исследования, сформулированы рекомендации и предложены дальнейшие направления исследований в данной тематике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – обоснование метода и разработка принципов построения системы геотехнического мониторинга

оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах, основанных на совместном применении временного метода акустического вида неразрушающего контроля и метода испытаний грунтов радиальным прессиометром, которые позволят непосредственно контролировать изменение деформационных и прочностных характеристик оснований сооружений.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Проведенный анализ реакции криолитозоны на климатические изменения показал значительный рост количества аварийных ситуаций, связанных с деградацией оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах.

2. Проведенный анализ применяемых методов геотехнического мониторинга показал, что не один из методов не позволяет непосредственно контролировать изменение деформационных и прочностных характеристик оснований сооружений. В то же время методы акустического вида неразрушающего контроля широко применяются для изучения физико-механических свойств грунтов и горных пород и могут использоваться при мониторинге состояния оснований сооружений.

3. Обоснована возможность применения временного метода акустического вида неразрушающего контроля для решения задач геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах.

4. Обоснован метод геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах, основанный на совместном применении метода испытаний грунтов радиальным прессиометром и временного метода акустического вида неразрушающего контроля, позволяющий непосредственно контролировать изменение деформационных и прочностных характеристик основания в зоне влияния сооружения на грунт. Своевременное выявление деградации оснований на вечномёрзлых грунтах позволит вовремя перейти к мероприятиям по стабилизации температурного режима основания сооружения.

5. Для обработки результатов проведенного геотехнического мониторинга оснований сооружений на

вечномерзлых грунтах и оценки состояния основания разработана цифровая модель, связывающая характеристики грунтов с информативными параметрами акустических сигналов.

6. Экспериментально подтверждены теоретические выводы о возможности применения временного метода акустического вида неразрушающего контроля для решения задач геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

7. Разработан проект методики геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, позволяющий используя установленные корреляционные зависимости определять деформационные и прочностные характеристики основания сооружения по результатам продольно-поперечного акустического прозвучивания.

8. Разработана система геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах, основанная на временном методе акустического вида неразрушающего контроля и методе испытаний грунтов радиальным прессиометром.

9. Разработан проект метрологического обеспечения системы геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномерзлых грунтах.

10. Разработан проект методики создания стандартных образцов мерзлого песка.

Основными направлениями изучения данной тематики являются дополнительные исследования взаимосвязи акустических, деформационных и прочностных характеристик на образцах ненарушенного сложения, а также исследования предложенной методики в условиях Арктической зоны РФ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Потапов, А.И. Температурный контроль вечномерзлых грунтов / А.И. Потапов, А.И. Шихов, Е.Н. Дунаева // Автоматизация в промышленности. – 2019. - №12.

2. Потапов, А.И. Измерение динамических деформационных свойств мерзлого грунта при оттаивании / А.И. Потапов, А.И. Шихов, Е.Н. Дунаева // Автоматизация в промышленности. – 2020. - №10.

3. Потапов, А.И. Определение динамического модуля упругости вечномерзлых грунтов при оттаивании по кинематическим характеристикам упругой волны / А.И. Потапов, А.И. Шихов, Е.Н. Дунаева // Контроль. Диагностика. – 2021. - №3.

В изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Shikhov, A.I. Ultrasound methods and for examination of physical and mechanical properties of rocks / A.I. Shikhov, E.N. Dunaeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 194

5. Potapov A.I. The pattern of changes in the velocity of propagations of ultrasonic waves in frozen soil samples during thawing / A.I. Shikhov, A.I. Potapov // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1582.

6. Potapov A.I. Geotechnical monitoring of frozen soils: problems and possible solutions / A.I. Potapov, A.I. Shikhov, E.N. Dunaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064.

7. Syasko V. Soil deformation model analysis in the processing of the geotechnical results / V. Syasko, A. Shikhov // E3S Web of Conference. 2021. Vol 266.

Патент:

8. Патент № 2743547 Российская Федерация Способ мониторинга состояния многолетнемерзлых грунтов, служащих основанием для зданий и сооружений, и устройство для его осуществления / А. И. Потапов, А.И. Шихов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

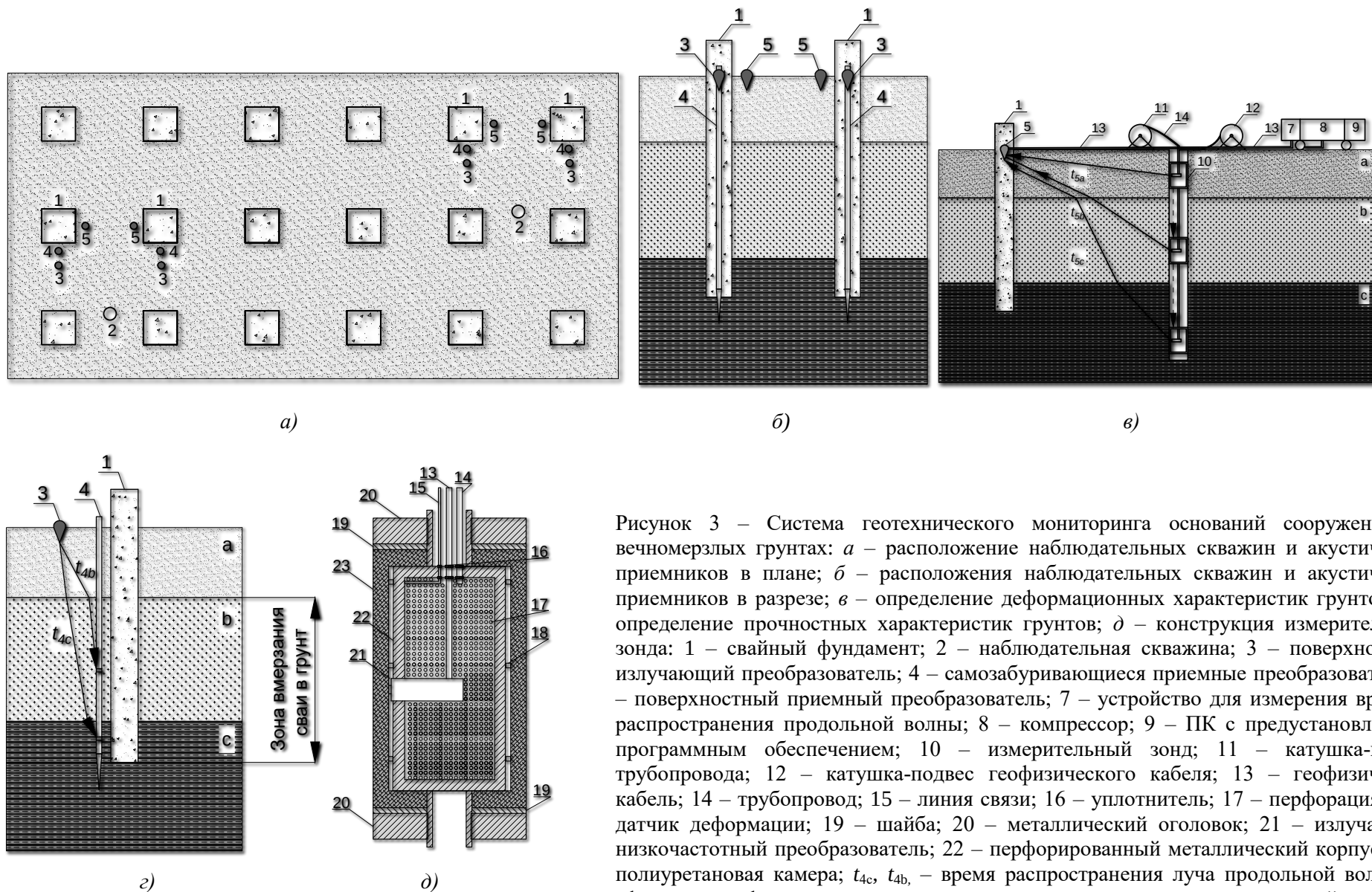


Рисунок 3 – Система геотехнического мониторинга оснований сооружений на вечномёрзлых грунтах: а – расположение наблюдательных скважин и акустических приемников в плане; б – расположения наблюдательных скважин и акустических приемников в разрезе; в – определение деформационных характеристик грунтов; г – определение прочностных характеристик грунтов; д – конструкция измерительного зонда: 1 – свайный фундамент; 2 – наблюдательная скважина; 3 – поверхностный излучающий преобразователь; 4 – самозабуривающиеся приемные преобразователи; 5 – поверхностный приемный преобразователь; 7 – устройство для измерения времени распространения продольной волны; 8 – компрессор; 9 – ПК с предустановленным программным обеспечением; 10 – измерительный зонд; 11 – катушка-подвес трубопровода; 12 – катушка-подвес геофизического кабеля; 13 – геофизический кабель; 14 – трубопровод; 15 – линия связи; 16 – уплотнитель; 17 – перфорация; 18 – датчик деформации; 19 – шайба; 20 – металлический оголовок; 21 – излучающий низкочастотный преобразователь; 22 – перфорированный металлический корпус; 23 – полиуретановая камера; t_{4a} , t_{4b} , – время распространения луча продольной волны со сферическим фронтом; t_{5a} , t_{5b} , t_{5c} – время распространения луча продольной волны со сферическим фронтом;

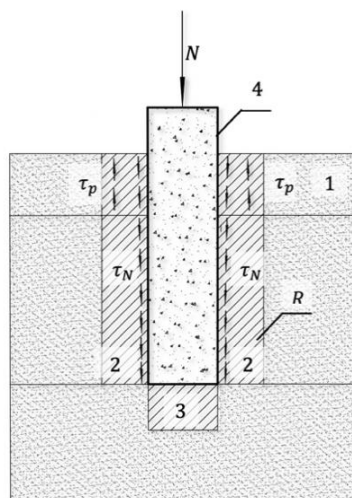


Рисунок 1 – Напряженно – деформируемое состояние системы «Свайный фундамент – вечномерзлый грунт»: 1 – слой сезонно талого грунта; 2 – зона вмерзания сваи в грунт; 3 – зона компрессионного сжатия грунта; 4 – свая; N – нагрузка, передаваемая от сооружения и веса сваи; τ_p – выталкивающая сила от пучения промерзающих грунтов; τ_N – сопротивление сдвигу по боковой поверхности смерзания; R – зона влияния сваи на грунты.

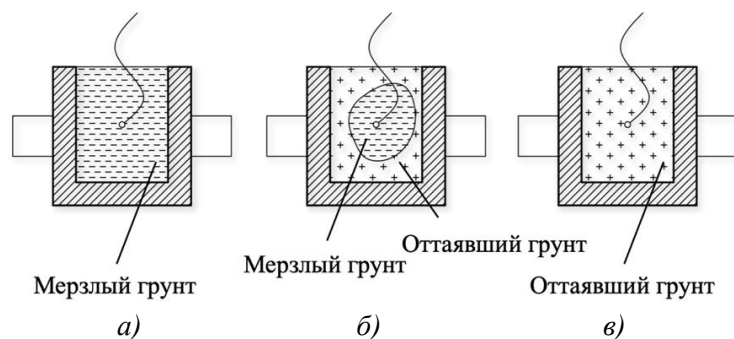


Рисунок 2 – Состояние образцов на протяжении всего цикла оттаивания: а – состояние образца в начале и конце первого этапа; б – состояние образца в конце второго этапа; в – состояние образца в конце третьего этапа.

Таблица 1 – Акустические характеристики грунтов

Песок, $W=10\%, \rho = 1,7 \text{ г/см}^3$		Песок, $W=20\%, \rho = 1,7 \text{ г/см}^3$	
$t, ^\circ\text{C}$	$V_p, \text{ м/с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$V_p, \text{ м/с}$
-15	2800	-15	3050
-10	2700	-10	2900
-5	1500	-5	1650
0	1380	0	1500
Коэффициент корреляции			
-0,93		-0,94	

Таблица 2 – Результаты проведенных экспериментальных исследований взаимосвязи акустических и прочностных характеристик мерзлых грунтов

Время выдержки	Образец №1	Образцы № 2-4	Образец №5	Образцы № 6-8	Образец №9	Образцы № 10-12
$T, \text{ мин}$	$V_p, \text{ м/с}$	$R_{af}, \text{ КПа}$	$V_p, \text{ м/с}$	$R_{af}, \text{ КПа}$	$V_p, \text{ м/с}$	$R_{af}, \text{ КПа}$
0	3720	354	3590	341	3633	367
15	3078	167	2950	186	3018	173
45	2154	45	2260	47	2037	52
R	0,95					

Таблица 3 – Результаты проведенных экспериментальных исследований взаимосвязи акустических и деформационных характеристик грунтов.

Грунт	Метод определения E	Значение E при температуре, МПа		
		-10°C	-3°C	$(-1 \div 0)^\circ\text{C}$
Песок	Акустический	9800	9300	6800
	Одноосное сжатие	163	150	121
	Корреляционная зависимость	157	151	118
	Отклонение	4%	1%	3%
	Коэффициент корреляции	0,977		