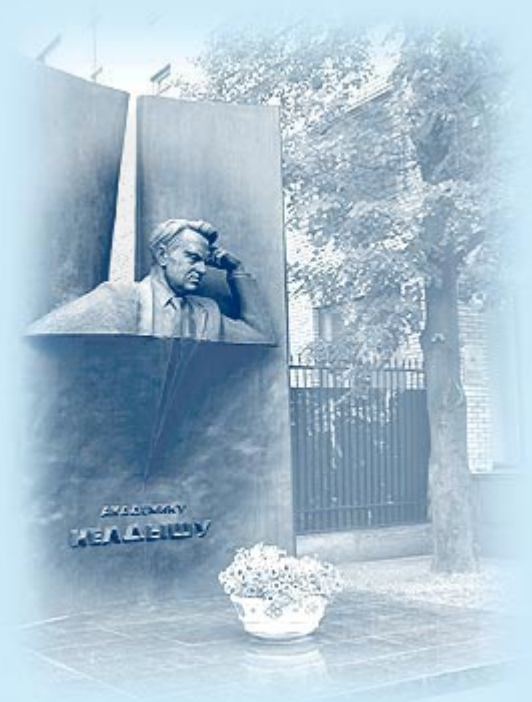




ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 29 за 2024 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

В.И. Балута, С.С. Варыханов,
А.Ф. Жирков

Подход к построению
когнитивно-факторной
модели оценки устойчивости
объектов в криолитозоне

Статья доступна по лицензии
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Балута В.И., Варыханов С.С., Жирков А.Ф. Подход к построению когнитивно-факторной модели оценки устойчивости объектов в криолитозоне // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2024. № 29. 24 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2024-29>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2024-29>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

В.И. Балута, С.С. Варыханов, А.Ф. Жирков

**Подход к построению когнитивно-
факторной модели оценки устойчивости
объектов в криолитозоне**

Москва — 2024

Балута В.И., Варыханов С.С., Жирков А.Ф.

Подход к построению когнитивно-факторной модели оценки устойчивости объектов в криолитозоне

Проблема потепления климата рассматривается в качестве одной из угроз, способных привести к деградации инфраструктуры в северных регионах из-за снижения несущей способности грунтов. Задача оценки устойчивости инфраструктурных объектов требует комплексного подхода, в равной мере учитывающего как погодно-климатические, так и антропогенные факторы. В статье рассматривается возможность построения такой оценки на основе когнитивно-факторного подхода. Описываются физические аспекты задачи, способы построения модели, источники обеспечения данными для настройки модели. Приводится вариант комплексной модели. Рассмотрен пример определения значений факторов влияния на основе обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: когнитивно-факторная модель, устойчивость инфраструктуры в криолитозоне, физические процессы в криолитозоне.

Viktor Ivanovich Baluta, Sergey Sergeevich Varychanov, Aleksandr Fedotovitch Zhirkov

An approach to the construction of a cognitive factor model for assessing the stability of objects in the cryolithozone

The problem of climate warming is considered as one of the threats that can lead to degradation of infrastructure in the northern regions due to a decrease in the bearing capacity of soils. The task of assessing the sustainability of infrastructure facilities requires an integrated approach that equally takes into account both weather and climatic and anthropogenic factors. The article considers the possibility of constructing such an assessment based on a cognitive factorial approach.. The physical aspects of the task, methods of building a model, and sources of data for configuring the model are described. A variant of the complex model is given. An example of determining the values of influence factors based on the processing of experimental data is considered.

Key words: cognitive factor model, stability of infrastructure in the cryolithozone, physical processes in the cryolithozone.

Введение

Социально-экономическое развитие северных регионов России, которое входит в число важнейших стратегических задач государства [1,2], связано с необходимостью интенсификации полномасштабного освоения территорий и увеличением масштабов строительства разнообразных объектов общего и целевого назначения: жилых, административных, производственных зданий и сооружений, энергетических и тепловых сетей, трубопроводной и дорожной инфраструктуры, коммуникаций связи и множества других. С геологической точки зрения большая часть северных территорий относится к зоне криолита, а сооружение объектов на многолетнемёрзлых грунтах требует применения специализированных технологий обеспечения их устойчивости в связи со сложными геофизическими процессами, протекающими в деятельном слое грунта.

Стоит заметить, что вопросы оценки устойчивости инфраструктурных объектов в районах криолитозоны сводятся традиционно к рассмотрению динамики процессов протаивания и промерзания грунтов. В научной литературе эти процессы, как правило, рассматриваются в парадигме решения системы уравнений в частных производных в постановке так называемой задачи Стефана. При этом в зависимости от количества учитываемых в модели факторов, способов задания начальных и граничных условий, а также значений характеристических показателей получаемые результаты могут приводить к заметно различающимся выводам [3]. Одним из ключевых параметров, изучаемых исследователями, является глубина протаивания грунта, а также зависимость этой величины от различных условий и факторов, динамика её изменения за длительные периоды.

Потепление климата, эффекты которого наиболее сильно проявляются в северных широтах, - объективная реальность последних десятилетий. Прогнозируется, что сохранение этой тенденции уже в ближайшей перспективе может привести к катастрофическим последствиям для множества объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера [4, 5]. А если судить по приводимым данным [6, 7], то их состояние уже и в настоящее время далеко от желаемого. Многими исследователями [8, 9] подчеркивается, что антропогенные факторы при этом играют сравнимую, если не большую роль, чем природно-климатические, а потому решение этой задачи должно рассматриваться комплексно в парадигме природно-технических систем, что сложно реализовать в рамках традиционных подходов.

В качестве дополнительной альтернативы традиционным подходам предлагается рассматривать возможности использования потенциала технологий когнитивно-факторного моделирования для комплексной превентивной оценки состояния природно-технических систем. В последние годы это направление наряду с нейросетевыми подходами интенсивно

развивается применительно к изучению поведения сложных слабоформализуемых систем [10, 11].

Физические аспекты задачи

Сложность обеспечения устойчивости объектов, строящихся в так называемой криолитозоне, наиболее наглядно проявляется при рассмотрении этой задачи с позиций анализа физических явлений, совокупность которых характеризуется множеством противоположно направленных и взаимно конфликтующих процессов.

Сложности обеспечения устойчивости фундаментов. Условия, при которых возможно строительство объектов на прочных скальных основаниях, на севере встречаются сравнительно редко. Поэтому по большей части строительство вынужденно ведётся на многолетнемерзлых грунтах, прочностные свойства которых в существенной мере зависят от состава слагающих пород и текущих значений температуры. В большинстве своем строящиеся объекты располагаются на свайных фундаментах, в которых используются так называемые «висячие» сваи – сваи, не опирающиеся на прочные основания в глубине. В отличие от стоек эти сваи держатся в окружающей грунтовой среде за счет сил сцепления и трения. Количество и длина свай рассчитываются исходя из общей нагрузки, которая должна быть распределена между ними, и условий их связи с окружающим грунтом.

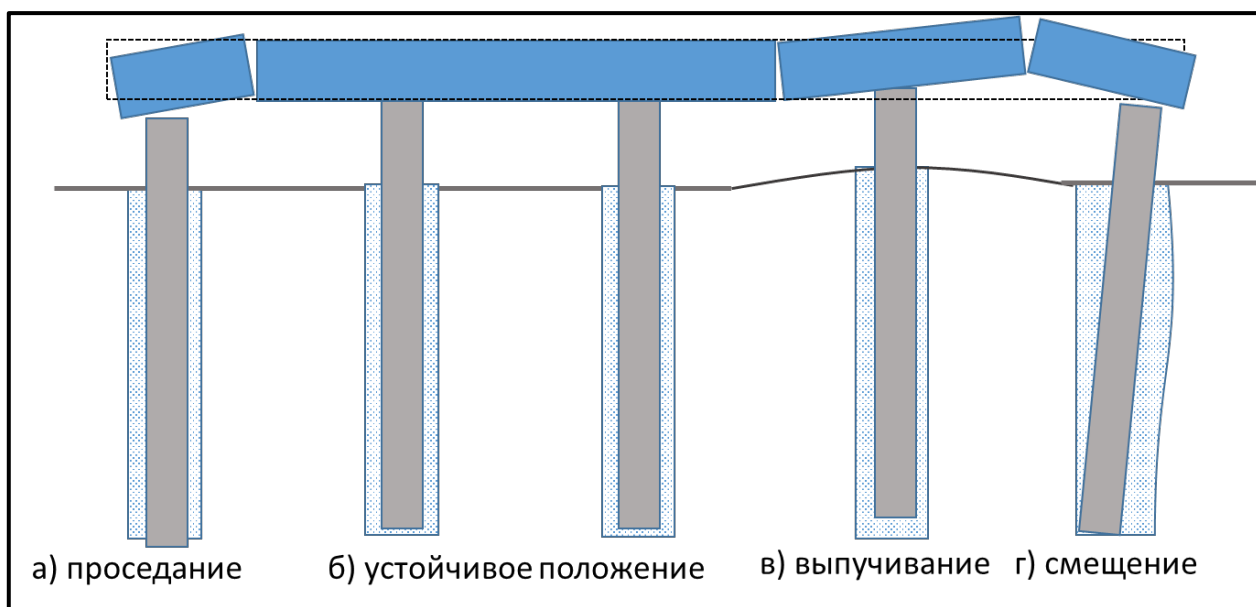


Рис. 1. Условная схема возможных состояний свайного фундамента

При температурах окружающей грунтовой среды ниже нуля сваи вмораживаются в грунт, и коэффициенты их сцепления с породой достаточны, чтобы удерживать значительную нагрузку. При колебаниях температуры грунтовой среды её прочностные свойства значительно изменяются: при

повышении температуры грунт становится более пластичным и силы сцепления уменьшаются, при понижении, напротив, сцепление увеличивается. При сильном промерзании сам грунт в случае его большой влажности может значительно увеличиваться в объеме, особенно при большом содержании глинистых фракций, что приводит к эффектам вспучивания и выпирания наверх свай, прочно вмороженных в грунт (рис.1в). Этот же грунт в талом состоянии теряет прочностные свойства и становится «ползучим», что может приводить к обратным эффектам – или проседанию свай (рис.1а), или смещениям грунта, сопровождающимся наклоном свай (рис.1г). При неоднородных условиях в пределах грунтовых оснований, особенно под протяженными сооружениями, процессы подъема и опускания разных свай могут происходить «рассогласованно», что может приводить к появлению дополнительных напряжений в конструкциях опирающихся на сваи сооружений, вплоть до появления деформаций, трещин, сколов, разрывов (рис.1). Помимо этого, происходящие в регулярном режиме температурные «колебания» грунтов в основании сооружений при большой длине свай могут порождать продольные и поперечные напряжения в самих сваях, а в силу множественности таких колебаний на протяжении периода их эксплуатации вполне вероятно развитие усталостных нарушений целостности и потери прочности.

Обычно ввиду однородности плотного материала и наличия металлического каркаса коэффициент теплопроводности свай отличается от аналогичного коэффициента окружающей среды, поэтому при наличии градиента температуры между верхним и нижним концом сваи – а это естественное следствие суточного колебания температур над поверхностью в отличие от квазистабильных их значений на глубине – температурный режим внутри сваи всегда несколько отличается от наружного. Другими словами, в жаркие летние дни свая может выполнять роль нагревателя, заглубленного в грунт, а в холодные зимние – напротив. И за счет этого выступающая над грунтом часть сваи всегда более холодная летом (или более теплая зимой), чем окружающий воздух. В результате возникают дополнительные перетоки тепла в местах контакта свай с окружающей породой, которые могут оказывать влияние на характеристики их сцепления. Даже если в большинстве случаев условий эксплуатации сооружений это влияние может быть незначительным, в окрестности точек бифуркации и оно может сыграть критическую роль спускового механизма для запуска негативных процессов.

Погодно-климатические факторы. Термодинамические процессы в самом грунте тоже имеют весьма сложный характер [12], при котором температурно-влажностный режим в пределах так называемого сезонно-талого слоя изменяется в весьма широких диапазонах, обусловленных как региональными особенностями, так и колебаниями сезонных, климатических и погодных условий. Наблюдаемые в верхних слоях земной поверхности сезонные (а в переходные периоды – ещё и суточные) процессы таяния и

замерзания грунтов предопределяются глобальными конкурирующими процессами нагрева поверхности Земли как планеты коротковолновым (в ультрафиолетовом и световом диапазонах) солнечным излучением и ее охлаждения за счет длинноволнового (инфракрасного, теплового) излучения в окружающее пространство. И если нагрев происходит импульсно в период дневного облучения поверхности, то охлаждение – процесс постоянный, интенсивность которого зависит от температуры излучающей среды. При этом также наблюдаются конкурентные процессы, поскольку часть излучаемого поверхностью тепла рассеивается в атмосфере, нагревая воздух, из-за чего присутствует возможность обратного возврата в грунт какой-то доли потерянного тепла. Учитывая значительные сезонные различия между продолжительностью дня и ночи в верхних широтах, понятно, что и превалирование одного из процессов – нагрева верхнего слоя грунта или его охлаждения – над другим зависит от времени года, времени суток, да и от погоды тоже. Летом, когда длительность светлого времени суток значительно превалирует над ночной, интегральная доля тепловой энергии, поступающей в грунт, заметно превышает потери тепла, что приводит к прогреву породы и таянию мёрзлого грунта. При наличии облачности прямого солнечного излучения доходит непосредственно до дневной поверхности несколько меньше, но часть его поглощается находящимся в атмосфере паром и способствует повышению температуры воздуха. Если температура воздуха выше температуры поверхности, то некоторая доля этой энергии за счет механизмов конвективного теплообмена передается в грунт. При обратном значении градиента происходит охлаждение поверхности. Конвективный теплообмен между воздухом и поверхностным слоем грунта усиливается при наличии ветра за счет турбулизации пограничного слоя. При наличии растительного или снежного покрова они выполняют роль демпфирующего потока тепла слоя, снижающего интенсивность процессов нагрева или охлаждения поверхности.

Тепло, поступающее на земную поверхность и нагревающее верхний слой грунта, распространяется вглубь, прогревая более глубокие слои. Поскольку грунт, как правило, представляет собой разнородную среду из агломератов, включающих в себя частицы породы, органических останков, а также поры, заполненные воздухом или водой, в геофизике рассматриваются три механизма передачи тепловой энергии в такой среде: кондуктивный, когда тепло распространяется за счет нагрева частиц, контактирующих с более теплыми, тепловое излучение, которое излучают нагретые частицы и тепло передается через воздушную среду внутри пор, и конвективный теплообмен, когда растаявшая жидкость протекает в поровом пространстве, прогревая нижележащие слои. В реальной грунтовой среде все эти процессы протекают крайне медленно в силу нескольких причин: незначительной площади контакта частиц между собой, снижающих сплошность среды, из-за больших тепловых затрат на фазовые переходы воды из твердого в жидкое состояние, а также

ввиду импульсного характера тепловых интервенций в противовес постоянно действующему обратному процессу охлаждения, вызывающему колебания между процессами нагрева днем и охлаждения ночью. Из-за этого в реальности наблюдается значительный сдвиг по времени распространения тепловой волны в глубину породы по отношению к максимуму поступления тепловой солнечной энергии на дневную поверхность: если наибольшая продолжительность световых дней наблюдается в последней декаде июня, то наибольшая глубина протаивания грунтовой среды отмечается только в сентябре. Динамика этих процессов может искажаться в местах расположения свай: во-первых, сами сваи представляют из себя сплошную среду с более высокими коэффициентами теплопроводности, чем окружающий их грунт, во-вторых, вдоль поверхности свай присутствуют сквозные вертикальные разрушения породы, способствующие более интенсивному прониканию влаги вглубь массива. Последнее, кстати, влияет и на характер сцепления поверхности сваи с породой, выполняя роль своеобразной смазки. При этом стекающая вниз жидкость на поверхности свай может образовываться не только за счёт таяния окружающего мёрзлого грунта, но и за счёт конденсации атмосферной влаги на более холодной по отношению к воздуху поверхности свай в их выступающей над грунтом части.

Антропогенные факторы. Специалисты, занимающиеся исследованием природно-технических систем, отмечают значительное влияние человеческой деятельности на параметры окружающей среды в таких системах. Поэтому к приведенному описанию физической картины протекающих в сезонно-талом слое процессов имеет смысл добавить возможное их изменение под воздействием антропогенных факторов. Обычно сваи находятся в тени сооружений, и прямого нагрева поверхности грунта солнечным излучением в местах их заглубления не происходит. В этой же зоне отсутствует растительность и снежные сугробы имеют другие характеристики в отличие от зоны вне строений. Просвет между поверхностью земли и нижней частью опирающихся на сваи сооружений сказывается на характере ветрового обдува и значениях турбулентного теплообмена. Различия в тепловом режиме на поверхности вокруг здания и под ним формируют тепловые потоки различной интенсивности в смежных зонах, что влечет за собой возникновение горизонтальных перетоков тепловой энергии помимо вертикальных. Само здание или сооружение с целью создания комфортных условий для жизни и работы людей должно обеспечиваться теплом, водой, электроэнергией, для чего к нему подводятся инженерные сети тепловых, энергетических и коммунальных коммуникаций. Поступающее тепло в итоге рассеивается в окружающей среде, также оказывая какое-то влияние на состояние последней. Объемы и графики обеспечения коммунальными ресурсами определяются назначением, характером и интенсивностью использования зданий или сооружений. Какие-либо нарушения в работе коммунальных коммуникаций, например, протечки воды или стоков, могут оказать еще более радикальное

воздействие на состояние грунтового основания. Причем необязательно нарушения коммуникаций, связанных с самим объектом, но также и обусловленные расположением и характером функционирования соседних объектов или отсутствием ливнестоков, концентрацией ливневых потоков при асфальтировании дорог и площадок у домов и т.п.

К числу антропогенных факторов можно отнести и сами процессы проектирования, строительства, эксплуатации объектов. Их текущее состояние в значительной мере предопределяется не только внешними условиями, но и временем строительства, действовавшими на тот момент нормативами, имевшимися материальными возможностями и ресурсами, качеством контроля на этапах создания, сроком эксплуатации, изношенностью материалов, и даже теми коллективами или командами, которые занимались решением этих вопросов.

Если исключить из рассмотрения факторы антропогенного влияния, а также учесть, то даже приведенное конспективное описание картины протекающих в сезонно-талых слоях грунта физических процессов, хотя и является не полным, тем не менее достаточно, чтобы продемонстрировать сложность их воспроизведения в рамках расчётных физико-математических (имитационных) моделей. Эта сложность усугубляется ещё и недостаточным или неточным знанием значений большинства параметров и характеристик пород в конкретных местах расположения свайных фундаментов, особенно ввиду динамического характера большинства из этих характеристик. Например, одной из таких динамических характеристик можно считать влажность грунта, зависящую от времени года, температуры среды, наличия и количества осадков, а с величиной влажности естественным образом связаны коэффициенты теплопроводности, теплопередачи, затраты энергии на фазовые переходы и т.д. Очевидно, что с помощью расчетных физико-математических моделей можно исследовать поведение ключевых факторов в тех или иных условиях, определять их взаимовлияние, выявлять какие-то базисные тенденции, но использовать их для превентивных прогнозов при оценке состояния того или иного элемента фундамента или объекта в целом, в общем-то, проблематично. В то же время нельзя отрицать, что благодаря в том числе математическому моделированию, на основе множественных экспериментальных и теоретических исследований, обобщения накопленного опыта сформировалась и продолжает совершенствоваться определенная система правил, традиций, норм строительства в криолитозоне.

Вопросы мониторинга и диагностики

Нормативная база. Одной из ключевых проблем при строительстве в зонах многолетнемерзлых пород является обеспечение стабильной устойчивости объектов. Эта проблема решается за счет разработанных применительно к условиям региона и локально адаптируемых технологий и методов проектирования, строительства и последующей эксплуатации зданий,

сооружений, инженерных и транспортных сетей и других инфраструктурных объектов. Как правило, предпринимаемые на этих этапах превентивные меры обеспечения безопасности базируются на целевых научных исследованиях и накопленном практическом опыте, обобщаемых в нормативных документах и требованиях, а осуществляются исходя из полученных в период инженерно-строительных изысканий данных. Под превентивными мерами здесь понимаются многообразные способы минимизации рисков возникновения ошибок производственно-эксплуатационной деятельности специалистов на различных этапах жизненного цикла объектов. В [13] отмечается, что причины ошибочных решений обычно обусловлены:

1. Техническими ошибками, связанными с:

- неправильным проектированием из-за неверных исходных данных, ошибок в расчетах, неправильного выбора сырья, материалов, технологий и т.п.;
- неправильным изготовлением из-за некорректных замен материалов или комплектующих, несоблюдения технологий, использования бракованных изделий и т.п.;
- неправильной эксплуатацией в части нарушения регламентов, режимов использования и т.п.

2. Организационными ошибками, связанными с отсутствием должной организации работ и системы контроля на этапах проектирования, строительства и эксплуатации, что формирует почву для появления технических ошибочных решений и действий.

3. Недостаточной квалификацией и подготовкой персонала, провоцирующей появление технических и организационных ошибок.

По мере расширения номенклатуры строящихся объектов и накопления опыта их эксплуатации происходит перманентное совершенствование технологий, и в ряде случаев ранее считавшиеся правильными нормативные требования оказываются недостаточно полными или даже ошибочными. Другими словами, вышеупомянутых превентивных мер недостаточно для гарантированного обеспечения безопасности объектов. Помимо наращивания опыта становится очевидным также, что как динамически изменяющиеся природные, так и постоянные антропогенные воздействия на окружающую среду приводят к различным изменениям самих параметров среды в районах расположения объектов, которые тоже могут стать причиной развития негативных тенденций. Целям своевременного их выявления и снижения рисков нарушения функциональности объектов служит техническое диагностирование, для осуществления которого используются различные системы мониторинга и диагностического контроля. Согласно [14] под термином «техническая диагностика» понимается обширная область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Контроль технического состояния объекта исследования, выявление, поиск мест и определение причин нарушений, а также прогнозирование

технического состояния на некоторую перспективу происходят непосредственно в процессе технического диагностирования. Исходя из общетеоретических подходов соответствующие процессы диагностирования разрабатываются применительно к сфере их применения, в частности, существуют отдельные методы и технологии оценивания состояния зданий и сооружений различного типа и назначения.

Государственным стандартом [15] предусматривается, что мониторинг технического состояния зданий и сооружений проводят для:

- контроля их технического состояния и своевременного принятия мер по устранению возникающих негативных факторов, ведущих к ухудшению этого состояния;
- выявления объектов, на которых произошли изменения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций и для которых необходимо обследование их технического состояния;
- обеспечения безопасного функционирования зданий и сооружений за счет своевременного обнаружения на ранней стадии негативного изменения напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований, которые могут повлечь переход объектов в ограниченно работоспособное или в аварийное состояние;
- отслеживания степени и скорости изменения технического состояния объекта и принятия в случае необходимости экстренных мер по предотвращению его обрушения.

Что касается освоения северных территорий, на сегодняшний день можно выделить различные уровни, масштабы и способы решения задач, связанных с оценкой состояния объектов и обеспечением устойчивости их эксплуатации.

Системы мониторинга. На государственном уровне для отслеживания характера глобальных изменений свойств многолетнемерзлых грунтов, прежде всего вызванных потеплением климата, начала разворачиваться Государственная система фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты [16]. Первый пункт этой системы открыт в Салехарде в мае прошлого года. Комплексная сеть наблюдения за мерзлотой будет развернута на всей территории залегания криолитозоны, которая охватывает большую часть Российской Федерации. Организацию и функционирование сети пунктов наблюдений, приём, анализ и хранение данных, подготовку справочной и отчетной информации и передачу сведений в Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды и ее загрязнений обеспечивает созданный в марте 2023 года Центр мониторинга состояния многолетней мерзлоты – структурное подразделение расположенного в Санкт-Петербурге Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Основой измерительной системы являются глубокие термометрические скважины, в которых располагается гирлянда из десятков датчиков с переменным шагом распределения по глубине, а также блок автоматической регистрации и подсистема передачи данных в режиме on-line.

Сеть мониторинга на территориях залегания многолетнемерзлых грунтов будет включать 140 пунктов, производящих непрерывные автоматические измерения температуры мерзлоты на разных глубинах. Система будет развернута на базе метеорологических станций Росгидромета, что позволит дополнить наблюдения за мерзлотой сопутствующими метеорологическими данными. Полученные данные будут использоваться для геотехнического мониторинга жилых, промышленных и инфраструктурных зданий и сооружений [17].

На ведомственном уровне одной из наиболее мощных локальных систем подобного автоматизированного контроля располагает компания НОВАТЭК [18]. Контроль за сохранением мерзлоты осуществляется с помощью геотехнического мониторинга посредством измерения температур грунтов до глубины заложения свай в процессе строительства и эксплуатации сооружений. Замеры температур осуществляются в специальных термометрических скважинах непосредственно под сооружениями с использованием термометрических кос. Термокосы состоят из цифровых датчиков температуры, содержащих полупроводниковый чувствительный элемент, совмещенный в едином корпусе с микроконтроллером, преобразующим сопротивление чувствительного элемента в цифровой код. Датчики температуры в защитных оболочках распределены по длине рабочей части термокосы. В зависимости от модификации термокос к разъему рабочей части подключаются электронные блоки, преобразующие цифровой выходной сигнал датчиков на основании их индивидуальных характеристик, для передачи данных по различным цифровым протоколам [19]. «Ямал СПГ» осуществляет данный вид контроля более чем в 2,5 тыс. скважинах, которые расположены под всеми объектами. Создание столь масштабной системы мониторинга было облегчено тем, что строительство объектов велось в последние десятилетия, когда уже имелись совершенные современные средства автоматизированного инструментального контроля, а его роль и значимость стали очевидны и заняли свое место в политике обеспечения безопасности зданий, сооружений и других инфраструктурных объектов.

Комплекс долгосрочных мер для мониторинга состояния своих объектов с целью оценки влияния процессов таяния вечной мерзлоты с 2021 года начал осуществляться и компанией «Норникель», хотя создание подобной системы затруднено тем, что значительная часть объектов города и комбината строились в середине прошлого века. На официальном сайте компании в разделе «Устойчивое развитие» дано описание параметров системы инженерно-геологического мониторинга [20], которая включает:

- интерферометрический анализ спутниковых изображений для выявления вертикальных и горизонтальных смещений элементов конструкций зданий и сооружений, в том числе их фундаментов;
- бурение скважин для уточнения характеристик грунтов оснований и установки специальных датчиков, позволяющих в режиме онлайн определять

температурное состояние грунтов оснований, их динамику, контроль уровня грунтовых вод;

- контроль состояния свай различными методами (сейсмоакустическим, ультразвуковым, сейсмическим) и раннее выявление возможных деформаций и коррозии конструкций;

- геодезическую съемку конструктивных элементов зданий с целью заблаговременного выявления деформаций (горизонтальных смещений и осадок).

«Норникель» использует межотраслевое решение (систему) автоматизированного геотехнического мониторинга технического состояния оснований и фундаментов зданий и сооружений, эксплуатируемых в зоне многолетнемёрзлых пород (ММП), на основе открытого протокола передачи данных LoRaWAN, разработанное компанией «СМИС Эксперт». В этом решении применена перспективная технология для решений в сфере геотехнического мониторинга оснований объектов, обеспечивающая ряд преимуществ по сравнению с традиционными проводными сетями: высокую дальность передачи данных (до 10 км); низкое энергопотребление с возможностью использования датчиков с автономным питанием от маломощных батарей АА за счет того, что большую часть времени датчики находятся в энергосберегающем (спящем) режиме и могут бесперебойно функционировать до 10 лет; удобный для России открытый стандарт с высокой степенью защиты передаваемых данных. В измерительных системах используются: беспроводные двухкоординатные инклинометры с радиоинтерфейсом, отслеживающие вертикальные перемещения (осадки, просадки, подъемы), отклонения (угол наклона) по вертикали (крены), горизонтальные перемещения (сдвиги), углы поворота основания фундамента и основных элементов конструкции; цифровые термометрические косы с радиоинтерфейсом, размещаемые в геотехнических скважинах, которые позволяют контролировать по всей длине скважины изменения температуры вечномёрзлого грунта, оттаивание которого может негативно влиять на состояние фундамента объекта; термогигрометры для контроля температурно-влажностного режима помещений внутри объекта и в основании фундамента. При контроле линейных объектов (дороги) упор делается на применении датчиков для измерения поверхностной деформации твердого грунта, параметров и динамики углубления трещин и горизонтальных смещений породы: экстензометры, трещиномеры, инклинометры [21]. Компания планирует в ближайшее время активно масштабировать своё решение для промышленных предприятий различных отраслей.

Группа компаний ZETLAB предлагает свой комплекс решений в виде Автоматизированной стационарной системы мониторинга инженерных конструкций (СМИК) [22], которая предназначена для предупреждения перехода объекта мониторинга в ограниченно работоспособное или аварийное состояние. В контуре системы используются цифровые датчики собственной

разработки, включая виброметр, сейсмометр, тензодатчик, струнный тензометр, инклинометр и узел сбора информации. СМИК позволяет обнаружить на ранней стадии изменения несущей способности грунтового основания, а также конструктивных элементов и своевременно информировать персонал дежурно-диспетчерской службы объекта о критическом изменении параметров состояния несущих конструкций объекта.

Оригинальное решение, не требующее кропотливой работы по установке множества разнообразных датчиков, разрабатывается учеными Томского государственного архитектурно-строительного университета [23]. Сообщается, что научный коллектив ТГАСУ разрабатывает из композитных материалов автоматизированную систему мониторинга общих и локальных деформаций строительных конструкций зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения (в том числе для резервуаров, трубопроводов, эстакад) в условиях деградации вечной мерзлоты и просадочных грунтов, в которой используются системы наружного наблюдения – видеокамеры, расположенные на объектах.

Превентивная диагностика. Если обобщить приведенные в рамках обзора инструментальных систем контроля и мониторинга технического состояния объектов примеры, можно видеть, что, с одной стороны, они ориентированы на получение значений некоторого определенного перечня диагностических параметров, причем набор этих параметров и характеристики средств измерения могут отличаться в разных системах мониторинга, с другой стороны, в любом случае решение о возникновении угрожающих состояний делается специалистами на основе анализа значений отдельных параметров путем сопоставления с некоторыми установленными априори в нормативных документах граничными величинами. Как правило, это происходит уже, как говорится, «по факту» происходящих изменений, когда ситуация может выйти за границу обратимости. Превентивные прогнозные оценки крайне затруднены в силу большого количества влияющих факторов и множества привходящих обстоятельств, порождающих пространство существенной неопределённости, особенно в силу отмеченного выше наличия противоречивых и разнонаправленных процессов в одних и тех же средах.

В этом ключе повсеместное развитие и внедрение мониторинговых систем для контроля состояния различных инфраструктурных объектов в районах криолитозоны можно считать весьма положительным моментом, поскольку они могут стать в итоге источником огромного количества данных натурных наблюдений, создающих в сочетании с фактами отмечаемых изменений состояния объектов основу для их анализа современными средствами обработки больших данных, в частности, с помощью нейросетевых технологий. Можно ожидать, что на подобной основе возможно развитие автоматических систем предиктивной диагностики, позволяющих получать заблаговременные прогнозы изменения обстановки для конкретных условий размещения и использования тех или иных инфраструктурных объектов, и в том числе с

учетом обозначенной выше критически важной роли неопределённости развития ситуаций. Собственно, на такую перспективу и рассчитаны проводимые нами исследования.

Для конкретизации дальнейших подходов и выработки средств и методов поиска решений в условиях неопределённости имеет смысл более детально остановиться на содержании самого этого понятия – понятия неопределённости, которое имеет множество трактовок/определений в зависимости от сферы использования. Самое общее, на наш взгляд, определение этого термина сформулировано в следующем выражении «неопределенность – отсутствие достаточных оснований для получения однозначных выводов». Одним из обобщающих исследований, посвященных этому вопросу, является работа [24]. В статье – только применительно к области социально-экономических систем –отмечается наличие множества ситуаций проявления этого понятия. Авторы, ссылаясь на выполненные ими обобщение и дополнение исследований ряда других специалистов, приводят классификацию, включающую более десятка характеристических признаков возможных видов неопределённости, которые в совокупности подразделяются на три большие группы:

неопределённость 1 рода	неопределённость обстановки;
неопределённость 2 рода	неопределённость принятия решений;
неопределённость 3 рода	неопределённость последствий принятых решений.

Неопределённость обстановки (среды) подразумевает, что информация относительно состояния среды, ее особенностей, принципов функционирования системы является неполной, недостоверной или неточной. Неопределённость принятия решений обусловлена недостаточным представлением о возможных траекториях развития событий и связанных с этим изменений обстановки. Неопределённость последствий принятых решений вызывается невозможностью однозначного соответствия в изменяющихся условиях получаемых после реализации решений итогов запланированным результатам, тем более с учетом отдаленных последствий.

Понятно, что оценка состояния объектов и выработка решений по поддержанию их функциональной работоспособности в процессе технической диагностики связана прежде всего с решением проблемы снижения уровня неопределённости.

На снижение уровня неопределённости 1 рода, касающейся повышения полноты и точности знания условий внешней среды и параметров внутренней обстановки, как раз и ориентированы системы организационного контроля и инструментального мониторинга.

В качестве наиболее известного способа снижения уровня неопределенности 2 рода можно считать методы математического моделирования. С помощью разработки и применения моделей, описывающих различные аспекты функционирования объекта контроля или его составных

частей в текущих, ожидаемых или теоретически возможных условиях обстановки, оцениваются диапазоны вероятного изменения моделируемых величин, что позволяет выбирать наиболее приемлемые в имеющихся условиях решения из множества альтернатив. Учитывая крайне высокую сложность, разнородность и конфликтность взаимодействия различных факторов и их причинно-следственных связей в задаче обеспечения функциональной устойчивости инфраструктурных объектов в условиях криолитозоны, в настоящей работе предлагается сделать упор на развитие технологии когнитивно-факторного моделирования, в рамках которого традиционные подходы в форме аналитических или численных математических моделей могут рассматриваться в качестве составных частей общей модели для оценки взаимовлияния каких-либо факторов.

Снижение уровня неопределенности 3 рода требует разработки специализированных инструментов поддержки принятия решений, ориентированных на комплексное обобщение результатов виртуальных экспериментов на моделях, использование экспертного опыта многочисленных решений и реакции среды на их осуществление.

Построение когнитивно-факторной модели

Рассматриваемая предметная область, связанная с оценкой текущего состояния объекта и предиктивной диагностикой возможных траекторий изменения ситуации в конкретной обстановке и условиях, требует одновременного знания и учета большого множества исходных данных, текущих значений параметров и динамики соотношений конкурирующих и конфликтующих между собой процессов. Создание сложной когнитивно-факторной модели предметной области аналогично построению экспертной модели, поскольку, с одной стороны, в её формировании может принимать участие множество разнопрофильных специалистов, с другой стороны, исходные значения самих факторов и характер связей между отдельными факторами в зависимости от их значений во многом определяются также экспертным путем и уточняются в дальнейшем в процессе апробации, практической настройки и функционирования модели в реальных условиях путем корректировки самой модели, настройки её связей. В какой-то мере эти процессы аналогичны процессам обучения нейросетевых моделей. Именно процессы совершенствования и повышения прогностических качеств когнитивно-факторной модели предметной области по мере накопления данных и знаний принимаются за процесс обучения модели. Механизмы самообучения должны быть встроены в алгоритмы совершенствования и развития модели и формирования на ее основе прогнозных оценок.

При описании с помощью когнитивно-факторной модели состояния сложной системы, включающей в себя все возможные для наблюдения или регистрации данные по значениям факторов, а также факторы, значения которых могут быть определены расчетом либо оценены экспертно на базе

ведущихся наблюдений, оно [состояние] может быть представлено в виде однозначного или приближенного значения вектора в фазовом пространстве, описывающем все возможные сочетания изменяющихся параметров. Имея картину связей между факторами в самой модели, можно строить пучок возможных траекторий развития ситуации из каждого текущего положения, а также оценивать подобным образом наиболее приемлемые воздействия на отдельные элементы системы для купирования рисков с последующей оценкой последствий такого вмешательства. Изначально разработанная с привлечением экспертов, являющихся специалистами в тех сферах, которые связаны с предметной областью, когнитивно-факторная модель как в части учета всех факторов влияния на искомый результат, так и включая рекомендации экспертов по вероятному характеру взаимовлияния факторов на связях модели, должна пройти стадию корректировки путем поиска согласованности соотношений модели на имеющихся экспериментальных данных, полученных из различных систем мониторинга, описывающих как параметрическое состояние объектов, так и закономерности поведения окружающей среды. Уточнение модели может продолжаться в перманентном режиме по мере поступления новых и расширения базы натурных данных.

Вариант схематического представления когнитивно-факторной модели (КФМ), базирующейся на обобщении представленного выше описания, приведен на рис. 2. Заметим, что это не единственное представление картины взаимосвязи и взаимовлияния факторов, которые имеет смысл рассматривать при оценке текущего состояния и прогноза устойчивости свайного фундамента. Во-первых, создаваемая модель может и должна дополняться или модернизироваться путем привлечения большего количества профильных специалистов и экспертов. Во-вторых, уровень сложности модели должен определяться целями решаемой задачи с необходимостью акцентирования внимания на тех или иных аспектах проблемы, то есть можно рассматривать как более простые, так и более сложные варианты. В-третьих, состав ключевых факторов и возможности настройки модели в значительной мере зависят от наличия и доступности исходных данных. С учетом этих замечаний представление предмета исследований в формате когнитивно-факторной модели можно использовать для моделирования различных ситуаций и исследования характера поведения системы в изменяющихся условиях.

Пример

Рассмотрим способ настройки когнитивно-факторной модели (КФМ) путем вычисления значений коэффициентов в приближении линейной зависимости между факторами на основе имеющихся сведений об их значениях на примере простой модели, включающей три элемента.

Исходя из общефизических соображений, можно ожидать, что глубина протаивания грунта непосредственно зависит от количества поступающей в грунт энергии. Эта величина, предположительно, пропорциональна интегралу от температуры воздушной среды в приземном слое, которую можно ориентировочно оценить через накопленную сумму произведений средней температуры воздуха на интервал осреднения за теплый период времени. При этом внешние условия, влияющие на общее количество поступающего в грунт тепла, например такие, как расположение площадки по отношению к солнцу, характер растительного покрова на ней и т.п., можно выразить через значение некоторого интегрирующего совокупное влияние этих условий коэффициента, связывающего эти факторы. Его значение будет зависеть от этих условий в каждом рассматриваемом году. Аналогично влияние на скорость и глубину распространения тепловой волны вглубь совокупности характеристик грунта, в частности таких, как льдистость или влажность пород, их литологический состав и т.п. также можно отобразить в виде некоторого обобщающего коэффициента. Таким образом мы получим простую когнитивно-факторную модель, связывающую три параметра, по которым имеются экспериментальные данные мониторинговых наблюдений. Такая модель представлена на рис. 3. На схеме в форме прямоугольников представлены величины, данные по которым можно получить из систем мониторинга, в форме овалов – искомые значения неизвестных величин (коэффициентов на связях).



Рис.3. Упрощенная модель оценки глубины протаивания грунта.

В нашем распоряжении имеются осредненные данные метеорологических наблюдений по изменению погодно-климатических условий в г. Якутске за длительный период времени, а также экспериментальные данные по динамике температур на различных глубинах в контрольных скважинах, расположенных на наблюдательном полигоне ИМЗ им. П.И.Мельникова СО РАН, включая данные по максимальной глубине протаивания грунтов (мощности сезонно-талого слоя - СТС) в этих же скважинах за период наблюдений. К сожалению,

не на всех экспериментальных площадках присутствует полный набор требующихся для исследования данных, в частности по измерениям температур в почвенном слое грунта, поэтому для анализа были выбраны четыре площадки, где можно было выделить хоть и отрывочные, но наиболее длительно фиксированные данные в интервалах наблюдений по этому параметру, с одной стороны, и с заметно отличающимися значениями мощности СТС, с другой. Этим условиям удовлетворяют площадки с порядковыми номерами 3а, 6б, 8 и 10 стационара Чабыда. К сожалению, в каждой из скважин приемлемые для обработки данные относятся к различным глубинам почвенного слоя (в частности, 0,0; 0,1; 0,15 м), в связи с чем они находятся в различных температурных диапазонах, однако для целей настоящей статьи данное обстоятельство не представляется значимым.

Краткое описание характерных условий расположения вышеперечисленных экспериментальных площадок, на которых проводились наблюдения, включая растительный покров и литологию верхних горизонтов грунта, приведено в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики экспериментальных площадок

Обозначение площадки	Характеристики поверхности и растительного покрова	Литология грунтовой среды (интервалы глубин приведены в метрах)	
Площадка 3а 	Днище долины ручья с мелкобугристым микрорельефом. Багульниковый ерник, сфагновые мхи (мощность до 0,2 м)	0,00-0,14 0,14-1,25 1,25-2,50 2,50-2,90 2,90-3,00	Сфагновые мхи Торф, с 0,5 м мёрзлый Песок мёрзлый Лёд Песок мёрзлый
Площадка 6б 	Приводораздельная часть пологого склона. Мертвопокровно-толокнян-ковый сосняк, сомкнутость крон деревьев 0,3-0,4.	0,00-0,04 0,04-12,00	Лесная подстилка (мёртвая хвоя) Песок, с глубины 4,00 м мерзлый, с 10 м с угольными остатками
Площадка 8 	Днище ложбины стока. Мохово-багульниково-брусничный лиственничник с примесью березы, сомкнутость крон деревьев 0,7-0,8.	0,00-0,02 0,02-0,06 0,06-30,00	Лесная подстилка из хвои, мха Оторфованный горизонт разложившейся подстилки Песок
Площадка 10 	Умеренно-крутой (10°-15°) склон северной экспозиции с мелкобугристым микрорельефом. Брусничный сосняк с ольховыми кустами, сомкнутость крон деревьев 0,4-0,5	0,00-0,01 0,01-0,03 0,03-0,30 0,30-0,80 0,80-1,60 1,60-2,00	Лесная подстилка из хвои, корней Оторфованный горизонт разложившейся подстилки Супесь Песок с галькой Супесь Суглинок

Обращаясь к схеме рис. 3, обозначим через $\Sigma T^+в$ значение первого фактора, $\Sigma T^+п$ – значение второго фактора, ξ – мощность СТС и, соответственно, через $K1$ совокупность факторов влияния поверхностного покрова, а через $K2$ – совокупность факторов влияния на транспорт энергии в грунте. Полученные на основании обработки экспериментальных данных для каждой из выделенных площадок значения этих величин приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения величин модели КФМ (к рис.3)

год	площадка 3а					площадка 6б					площадка 8					площадка 10				
	$\Sigma T^+в$	$\Sigma T^+п$	ξ	$K1$	$K2$	$\Sigma T^+в$	$\Sigma T^+п$	ξ	$K1$	$K2$	$\Sigma T^+в$	$\Sigma T^+п$	ξ	$K1$	$K2$	$\Sigma T^+в$	$\Sigma T^+п$	ξ	$K1$	$K2$
1986	18,79	24,60	0,42	1,309	0,017	18,79	0,63	4,04	0,03	6,45	18,79		1,23			18,79	13,50	1,88	0,72	0,14
1987	16,37	25,79	0,37	1,575	0,014	16,37	0,33	3,91	0,02	11,92	16,37	4,55	0,86	0,28	0,19	16,37	10,90	1,77	0,67	0,16
1988	19,61	23,65	0,46	1,206	0,019	19,61	2,69	4,00	0,137	1,487	19,61	5,02	1,29	0,26	0,26	19,61	13,04	2,11	0,67	0,16
1989	17,23		0,42			17,23		3,97			17,23		1,36			17,23	11,00	1,96	0,64	0,18
1990	19,22		0,37			19,22		3,93			19,22		1,08			19,22		1,70		
1991	18,67	23,00	0,47	1,232	0,020	18,67		3,87			18,67		1,23			18,67	13,10	1,87	0,70	0,14
1992	18,82	23,50	0,48	1,249	0,020	18,82		4,00			18,82		1,20			18,82	14,30	1,90	0,76	0,13
1993	18,20	24,62	0,50	1,353	0,020	18,20	1,52	4,03	0,084	2,646	18,20	0,11	0,86	0,01	7,68	18,20	12,63	1,94	0,69	0,15
1994	17,90	19,32	0,45	1,080	0,023	17,90	1,47	4,11	0,082	2,788	17,90	1,54	1,02	0,09	0,66	17,90	11,30	1,94	0,63	0,17
1995	18,93	23,00	0,40	1,215	0,017	18,93	2,06	4,02	0,109	1,951	18,93	1,94	1,08	0,10	0,56	18,93	10,41	1,83	0,55	0,18
1996	18,14		0,41			18,14	2,22	3,67	0,122	1,653	18,14		1,05			18,14	14,32	1,63	0,79	0,11
1997	19,68		0,41			19,68		3,86			19,68	1,83	1,08	0,09	0,59	19,68	13,43	1,93	0,68	0,14
1998	20,68		0,53			20,68		3,93			20,68	1,16	1,24	0,06	1,07	20,68	13,42	2,03	0,65	0,15
1999	18,47		0,44			18,47		3,76			18,47	1,88	1,14	0,10	0,61	18,47	11,34	1,99	0,61	0,18
2000	18,55		0,45			18,55		3,86			18,55	1,66	1,22	0,09	0,74	18,55	11,75	1,96	0,63	0,17
2001	19,15		0,46			19,15		3,63			19,15	2,12	1,04	0,11	0,49	19,15	12,61	1,95	0,66	0,15
2002	20,43		0,40			20,43		3,80			20,43	1,01	1,04	0,05	1,03	20,43	14,58	1,80	0,71	0,12
2003	19,03		0,46			19,03		3,81			19,03	1,30	1,13	0,07	0,87	19,03	15,52	1,96	0,82	0,13
2004	17,16		0,45			17,16		3,57			17,16	0,73	0,96	0,04	1,31	17,16		1,93		
2005	20,12		0,45			20,12		3,68			20,12	0,70	1,30	0,03	1,87	20,12		1,95		
2006	19,39		0,48			19,39		3,75			19,39	4,89	1,31	0,25	0,27	19,39		2,03		
2007	19,09		0,47			19,09		3,54			19,09	2,38	1,32	0,12	0,56	19,09		2,09		
2008	20,85		0,48			20,85		3,73			20,85	2,68	1,37	0,13	0,51	20,85		1,92		
2009	20,79		0,44			20,79		3,68			20,79	1,58	1,23	0,08	0,78	20,79		1,81		
2010	20,49		0,52			20,49		3,57			20,49	1,57	1,23	0,08	0,78	20,49		1,82		
2011	20,63		0,53			20,63		3,60			20,63	1,55	1,21	0,07	0,78	20,63		1,90		
2012	21,15		0,43			21,15		3,60			21,15	1,89	1,31	0,09	0,69	21,15		1,91		
2013	20,18		0,51			20,18		3,67			20,18	2,65	1,28	0,13	0,48	20,18		1,98		
2014	20,59		0,53			20,59		3,67			20,59	1,64	1,18	0,08	0,72	20,59		1,92		
2015	19,25		0,48			19,25		3,65			19,25	1,09	1,21	0,06	1,11	19,25		1,93		
2016	18,43		0,48			18,43		3,63			18,43	0,93	1,12	0,05	1,20	18,43		1,95		
2017	20,79		0,47			20,79		3,63			20,79	1,68	1,12	0,08	0,67	20,79		1,97		
2018	20,84		0,53			20,84		3,60			20,84	0,70	1,19	0,03	1,70	20,84		1,91		
2019	20,96		0,50			20,96		3,58			20,96	1,23	1,18	0,06	0,96	20,96		1,96		

Можно видеть, что количество так называемых «выбросов», когда наблюдаемая величина сильно отличается от среднего значения за период исследований, очень незначительно (всего 4 значения, к тому же относятся они к результатам начального периода наблюдений 1986-1988 гг.). Известно, что наличие выбросов вполне естественно при обработке экспериментальных данных, получаемых на интервале длительных по времени наблюдений, когда установить их первопричины затруднительно – помимо элементарных ошибок при ручной регистрации данных возможны и смена аппаратуры, и корректировка или изменение методик измерений, поэтому эти точки можно

исключить из анализа. Понятно, что в связи с большим числом привходящих факторов влияния, в первую очередь погодных условий, значения $K1$ и $K2$ не могут быть совсем одинаковыми от года к году на протяжении многих лет. Тем не менее, с учетом значительной неопределённости влияющих сопутствующих факторов, значения этих величин можно считать устойчивыми, поскольку они имеют сравнительно небольшой разброс на длительных временных интервалах. При этом диапазоны их колебаний для каждой из площадок свои, что свидетельствует именно о значимой роли влияния растительно-почвенного покрова ($K1$), с одной стороны, и литологии пород ($K2$), с другой, на наблюдаемую в экспериментах глубину протаивания грунта. Ввиду наличия такой устойчивости средние значения полученных величин, приведенные в таблице 3, могут быть приняты в качестве коэффициентов влияния в предложенной модели. При расширении модели уже конкретные характеристики растительно-почвенного покрова и особенности литологии могут быть рассмотрены в качестве дополнительных факторов, определяющих значения этих коэффициентов.

Таблица 3

Средние значения величин $K1$ и $K2$

	<i>Площадка 3а</i>	<i>Площадка 6б</i>	<i>Площадка 8</i>	<i>Площадка 10</i>
<i>K1</i>	1,277	0,107	0,09	0,68
<i>K2</i>	0,019	2,105	0,84	0,15

Заключение

Исходя из анализа различных источников, посвященных исследованиям проблемы обеспечения устойчивости инфраструктуры природно-технических систем при строительстве на многолетнемёрзлых грунтах, а также представлений о возможной значимости в этой проблеме тех или иных физических процессов можно сделать заключение о крайне высокой сложности решения этой задачи в рамках традиционных подходов математического моделирования. В настоящей работе рассматривается возможность применения методов когнитивных карт в форме когнитивно-факторного моделирования для решения указанной проблемы. На основе анализа природных и антропогенных факторов, которые могут быть значимы с точки зрения влияния на устойчивость свайных фундаментов сооружений, предложен вариант такой модели. Способ настройки когнитивно-факторной модели по имеющимся экспериментальным данным рассмотрен на примере простейшей трехфакторной модели, связывающей данные по динамике температур в приземном слое атмосферы, в почвенном слое грунтовой среды и по мощности сезонно-талого слоя для четырех экспериментальных площадок с различными условиями расположения. Установлена относительная устойчивость выявленных связей в течение длительного времени, что позволяет использовать

предложенный подход для оценки такого рода параметров в условиях неопределённости.

Библиографический список

1. Указ Президента РФ от 5 марта 2020 г. №164 "Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года".
2. Комплексная государственная программа Российской Федерации "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации". Постановление Правительства Российской Федерации от 30 марта 2021 г. № 484.
3. Павлов А.В. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата / А.В. Павлов, Г.З. Перльштейн, Г.С. Типенко // Криосфера Земли. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 3-12. – EDN KZYUCUD.
4. Бадина С.В. Прогнозирование социально-экономических рисков в криолитозоне российской Арктики в контексте перспективных климатических изменений // Проблемы прогнозирования. 2020. № 4 (181). С. 55-65. URL:<https://doi.org/10.1134/S1075700720040036>.
5. Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О. Интегральный подход к экономической оценке последствий деградации многолетней мерзлоты для устойчивости основных фондов в российской Арктике // Проблемы прогнозирования. 2023. № 2 (197). С. 30-43. URL:<https://doi.org/10.47711/0868-6351-197-30-43>.
6. Бобкин А.А. Разработка мероприятий по эксплуатации и обследованию зданий, расположенных в зоне распространения вечномёрзлых грунтов / А.А. Бобкин, Н.А. Подымкина // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 6(78). – с. 408-418. – EDN ZUHOSI.
7. Ледяева М. В Арктической зоне РФ из-за таяния вечной мерзлоты деформировано от 22 до 100 процентов зданий / Российская газета - Экономика Северо-Запада, №104(8752). <https://rg.ru/2022/05/17/reg-szfo/k-2025-godu-infrastrukturu-arktiki-nuzhno-adaptirovat-k-taianiui-merzloty.html?ysclid=lr1qmudquh443542071>.
8. Исаев С.В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. – 2016. – № 3(38). – С. 105-113. – DOI 10.17072/2079-7877-2016-3-105-113. – EDN WYMTON.
9. Игловский С.А. Антропогенная трансформация мерзлотных условий Европейского севера России и ее последствия // Арктика и Север. – 2013. – № 10. – С. 107-124. – EDN PVEPSB.
10. Рыков Ю.Г. Технология использования нечетких когнитивных карт с математической точки зрения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2021. – № 73. – С. 1-22. – DOI 10.20948/prepr-2021-73. – EDN OGPRHL.

11. О понятии влияния в концепции когнитивного моделирования при использовании функции активации типа ReLU / Балута В.И., Осипов В.П., Рыков Ю.Г., Четверушкин Б.Н. // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2023. – №4. – с.59-71. – <https://doi.org/10.14357/20718632230406>. - EDN AWCVVW.
12. Общее мерзлотоведение (геокриология), изд.2, переработанное и дополненное. / Учебник. Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1978 г. 464 с.
13. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль: учеб. пособие / А.П. Науменко; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с.
14. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 11 стр.
15. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014, 59 с. <https://internet-law.ru/gosts/gost/54142/?ysclid=lo5p8glg3e334032147>.
16. Федеральный закон от 10.07.2023 № 297-ФЗ. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49485>.
17. В России началось создание Государственной системы фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты / Новости ААНИИ. 19 мая 2023 года. <https://www.aari.ru/press-center/news/novosti-aari/v-rossii-nachalos-sozдание-gosudarstvennoy-sistemy-fonovogo-monitoringa-merzloty?ysclid=lnyeiggaoz756860160>.
18. Сайт компании НОВАТЭК. Охрана окружающей среды. Мониторинг многолетней мерзлоты. <https://www.novatek.ru/ru/development/environmental/crio/?ysclid=lnyf7cfffu426546269>.
19. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 августа 2021 г. № 1693. Описание типа средства измерений. Косы термометрические цифровые.
20. Норникель. Устойчивое развитие. Изменение климата. Вечная мерзлота. Инженерно-геологический мониторинг. <https://nornickel.ru/sustainability/climate-change/permafrost>.
21. Геотехнический мониторинг зданий и сооружений на многолетнемёрзлых грунтах, статья на сайте компании «СМИС-Эксперт». <https://smis-expert.com/blog/geotekhnicheskiiy-monitoring-zdaniy-i-sooruzheniy-na-mnogoletnemerzlykh-gruntakh/>.
22. Система мониторинга инженерных конструкций. Описание на сайте компании Зеленоградской ЭлетроТехнической ЛАБоратории (ZETLAB). Продукция. Системы под ключ. <https://zetlab.com/produkcija/sistemy-pod-kluch/sistema-monitoringa-inzhenernyih-konstruktsiy-smik/>.

- 23.ТГАСУ создает систему мониторинга состояния зданий на Крайнем Севере. Сообщение в новостной ленте РИАТОМСК от 25.02.2023. <https://www.riatomsk.ru/article/20230225/tgasu-monitoring-sostoyaniya-zdaniy-na-krajnem-severe/>.
- 24.Авдийский В.И., Безденежных В.М. Неопределённость, изменчивость и противоречивость в задачах анализа рисков поведения экономических систем // Эффективное антикризисное управление. 2011. № 3. — С. 46-61.

Оглавление

Введение	3
Физические аспекты задачи	4
Вопросы мониторинга и диагностики.....	8
Построение когнитивно-факторной модели.....	15
Пример.....	18
Заключение.....	21
Библиографический список.....	22