

Научная статья

УДК 519.23; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-21-32

ОБ АНАЛИЗЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

✉ **Рыбаков Анатолий Валерьевич;**

Иванов Евгений Вячеславович.

Академия гражданской защиты МЧС России, Москва, Россия.

Леонтьев Александр Викторович;

Муравьева Елена Викторовна.

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

✉ a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на устойчивость зданий, включая усадку почвы, изменение ее прочностных характеристик и влагопроницаемость, которые могут привести к деформации и разрушению конструкций. Приведено описание инженерно-технических мероприятий, направленных на снижение рисков, связанных с оттаиванием мерзлоты, включая глубокое закладывание фундаментов, использование теплоизоляционных материалов, систем дренажа и вентиляции, применение свайных фундаментов и мерзлотозащитных сооружений. Приведены результаты факторного и регрессионного анализов, направленные на разработку модели оценки состояния устойчивости фундаментов зданий в зависимости от климатических факторов для одного из объектов ПАО «ГМК «Норильский никель». Получена в виде полинома математическая модель, позволяющая определить влияние таких параметров, как температура окружающей среды, высота снежного покрова и скорость ветра, на угол отклонения конструкций зданий.

Ключевые слова: математическое моделирование, инженерно-технические мероприятия, вечная мерзлота, инклинометр

Для цитирования: Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Леонтьев А.В., Муравьева Е.В. Об анализе влияния климатических факторов на здания и сооружения опасных производственных объектов, расположенных в зоне вечной мерзлоты // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 21–32. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-21-32.

Scientific article

ON THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON BUILDINGS AND STRUCTURES OF HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES LOCATED IN THE PERMAFROST ZONE

✉ **Rybakov Anatoly V.;**

Ivanov Evgeny V.

Academy of civil protection of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia.

Leontiev Alexandr V.;

Muravyeva Elena V.

Kazan national research technical university of A.N. Tupolev, Kazan, Russia

✉ a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. The main factors influencing the stability of buildings, including soil shrinkage, changes in its strength characteristics and moisture permeability, which can lead to deformation

and destruction of structures, are considered. The description of engineering and technical measures aimed at reducing the risks associated with thawing of permafrost, including deep laying of foundations, the use of thermal insulation materials, drainage and ventilation systems, the use of pile foundations and permafrost protection structures. The results of factorial and regression analyses aimed at developing a model for assessing the stability of building foundations depending on climatic factors for one of the objects are presented PJSC MMC «Norilsk Nickel». A mathematical model has been obtained in the form of a polynomial, which makes it possible to determine the influence of parameters such as ambient temperature, snow cover height and wind speed on the angle of deviation of building structures.

Keywords: mathematical modeling, engineering and technical measures, permafrost, inclinometer

For citation: Rybakov A.V., Ivanov E.V., Leontiev A.V., Muravyeva E.V. On the analysis of the influence of climatic factors on buildings and structures of hazardous production facilities located in the permafrost zone // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 3 (71). P. 21–32. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-21-32.

Введение

Активное освоение арктических территорий в части строительства опасных производственных объектов способствует созданию условий для появления источников чрезвычайных ситуаций. В частности, вечная мерзлота оказывает различное негативное влияние не только на состояние заглубленных зданий и сооружений объектов, но и на их фундаменты. Вечная мерзлота – это грунт, который находится в постоянном состоянии заморозенности на протяжении большей части года. Этот тип мерзлоты имеет определенные физические свойства, которые нужно учитывать при проектировании и строительстве зданий, что, в частности, учитывается строительными нормами и правилами ряда государств, расположенных в Арктической зоне [1–4]. Вечная мерзлота, также известная как перманентная мерзлота, представляет собой важный фактор, влияющий на строительство и эксплуатацию зданий в условиях северных регионов. Влияние вечной мерзлоты на фундаменты зданий – это одна из ключевых проблем, с которой сталкиваются инженеры и строители [5–7]. Прежде всего вечная мерзлота очень твердая и имеет высокую прочность, что означает, что она может выдерживать значительные нагрузки. Однако при размораживании грунта могут возникать проблемы с его устойчивостью, что может привести к деформации и разрушению фундаментов зданий, а также объектов инфраструктуры [8].

К основным факторам, оказывающим существенное влияние на фундаменты зданий и сооружений опасных производственных объектов, можно отнести следующие:

1. Усадка почвы. Когда мерзлота тает, она становится мягкой и неустойчивой, что может вызвать смещение фундаментов и привести к деформации здания.

2. Изменение прочностных характеристик. В этом случае грунт может утратить свою прочность и упругость, что может привести к падению фундаментов и разрушению здания. Кроме того, дифференциальное таяние мерзлоты может вызвать неравномерные деформации фундаментов и структурных элементов здания.

3. Влагопроницаемость почвы. В результате оттаивания мерзлоты увеличивается уровень воды в грунте, что может привести к подмыву фундаментов и возникновению коррозии в структурных элементах здания.

Воздействия перечисленных факторов на опасные производственные объекты в настоящий момент могут быть снижены за счет проведения инженерно-технических мероприятий [9]. В частности, это:

1. Глубокое закладывание фундамента. Учитывая изменчивость глубины замороженного слоя в разных регионах, критически важно определить глубину, на которой фундамент будет устойчивым к деформациям, вызванным оттаиванием мерзлого грунта. Это требует тщательного инженерного анализа и учета геотехнических характеристик местности.

2. Использование теплоизоляционных материалов. Подходящие теплоизоляционные материалы могут значительно снизить теплопотери в землю от здания и тем самым уменьшить риск разрушения фундамента. Это может включать в себя использование теплоизолирующих блоков или добавление изоляционных слоев в сам фундамент.

3. Системы дренажа и вентиляции. Эффективные системы дренажа и вентиляции помогают контролировать уровень влажности в грунте вокруг фундамента, что снижает вероятность поднятия уровня грунтовых вод и минимизирует риск деформации конструкции из-за гидростатического давления.

4. Использование свайного фундамента. В случае, когда глубокое закладывание фундамента не является практичным или экономически оправданным, свайный фундамент может быть предпочтительным вариантом. Сваи, забитые до уровня стабильного мерзлого слоя, обеспечивают дополнительную устойчивость и защиту от деформаций.

5. Использование мерзлотозащитных сооружений. В некоторых случаях может быть целесообразно применять специальные мерзлотозащитные сооружения, такие как замороженные стены или тепловые заслоны, чтобы создать барьеры для защиты фундамента от оттаивания мерзлого грунта.

Методы исследования

Безусловно, перечисленные инженерные мероприятия являются эффективными для обеспечения защиты зданий и сооружений. Но они являются затратными и сложными для реализации. В связи с этим важным на сегодняшний момент остается применение технологий мониторинга за изменениями, происходящими со зданиями и сооружениями, расположенными на площадках опасных производственных объектов, находящимися в условиях вечной мерзлоты [10]. В частности, применение акустических методов или инклинометров для непрерывного наблюдения за наклонами стен, потолков и других конструкций зданий [11]. Накопленная информация о смещениях фундаментов может быть полезна для получения прогнозных состояний устойчивости зданий и сооружений с учетом климатических данных.

На рис. 1 приведена информация о распределении значений отклонений фундамента для одного из объектов, находящихся в зоне вечной мерзлоты. Представленные на графике данные свидетельствуют о том, что на протяжении девяти месяцев постоянно происходят отклонения от осей X и Y. То есть, по сути, здание постоянно находится «в движении». Поэтому технологии мониторинга остаются на сегодняшний день очень актуальными. Однако изобилие различных сведений и факторов, оказывающих влияние на рассматриваемые процессы, принуждает к проведению факторного анализа. Необходимо создавать аналитические модели на основе наблюдаемых параметров, чтобы иметь возможность своевременно зафиксировать возможные катастрофические отклонения и на основе этого обосновать объемы инженерно-технических мероприятий.

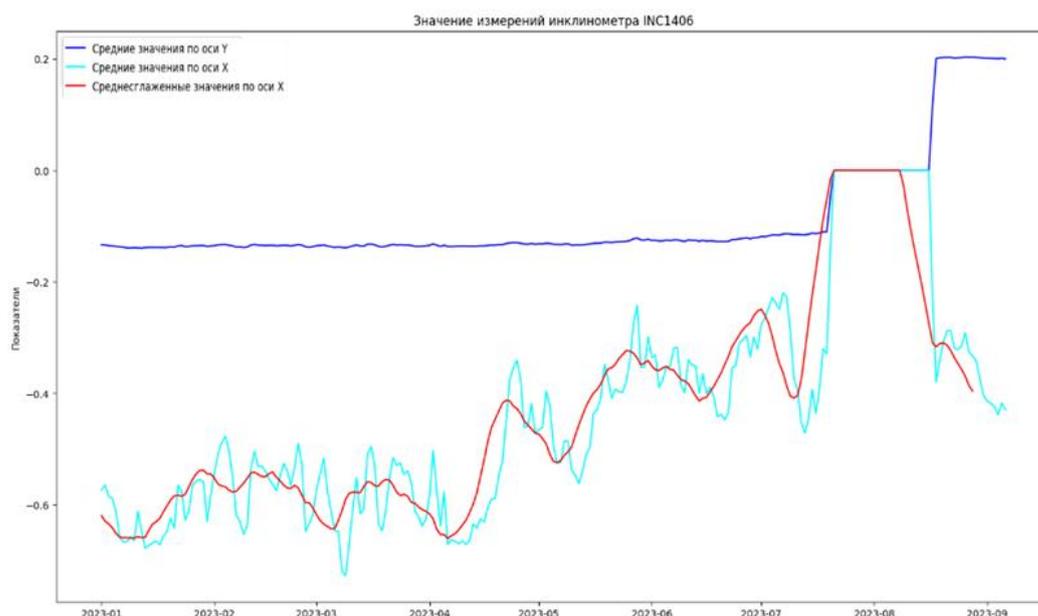


Рис. 1. Распределение значений инклинометра

Целью настоящей статьи является описание результатов проведенного факторного и регрессионного анализов для разработки модели оценки состояния устойчивости фундаментов зданий и сооружений в зависимости от климатических факторов.

Так для опасных производственных объектов ПАО «ГМК «Норильский никель» угроза обрушения зданий и сооружений рассматривается как наиболее опасная с точки зрения масштаба последствий реализации чрезвычайной ситуации. За последние 10 лет были накоплены данные о ежедневных климатических условиях (рис. 2): средняя скорость ветра, видимость, температура точки росы, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, высота снежного покрова.

Часы	Дата	Средняя скорость ветра, м/с	Видимость, км	Явления	Температура точки росы С	Относительная влажность воздуха %	Атмосферное давление - измеренное на уровне метеостанции атмосферное давление, гПа	Высота снежного покрова см
0:00:00	01.01.2023	2	20,00		-35,2	75	1 038,1	74,0
0:00:00	02.01.2023	1	20,00		-35,0	70	1 019,6	74,0
0:00:00	03.01.2023	1	20,00		-38,1	70	1 014,9	74,0
0:00:00	04.01.2023	0	20,00	{снег}	-35,7	76	1 013,3	73,0
0:00:00	05.01.2023	1	4,00	дымка	-41,1	70	1 009,8	74,0
0:00:00	06.01.2023	5	2,00	дымка	-44,4	70	1 002,9	73,0
0:00:00	07.01.2023	6	2,00	позёмок {метель}	-46,8	70	1 005,5	73,0
0:00:00	08.01.2023	4	10,00		-47,5	71	1 010,3	71,0
0:00:00	09.01.2023	6	20,00	позёмок {снег, мете}	-40,4	69	1 003,4	68,0
0:00:00	10.01.2023	4	4,00	дымка	-45,6	66	1 002,3	65,0
0:00:00	11.01.2023	6	4,00	позёмок	-38,1	69	1 009,2	65,0
0:00:00	12.01.2023	5	4,00	слаб. снег {метель}	-42,9	70	1 016,7	65,0
0:00:00	13.01.2023	4	20,00	{метель}	-45,6	66	1 022,0	63,0
0:00:00	14.01.2023	0	20,00		-51,4	62	1 019,2	63,0
0:00:00	15.01.2023	0	1,00	дымка	-49,2	72	1 015,8	63,0
0:00:00	16.01.2023	5	4,00	дымка	-48,2	64	1 013,4	64,0
0:00:00	17.01.2023	1	2,00	дымка	-51,1	54	1 022,8	64,0
0:00:00	18.01.2023	1	20,00		-49,8	67	1 030,1	63,0
0:00:00	19.01.2023	0	10,00		-46,1	71	1 026,8	63,0
0:00:00	20.01.2023	4	10,00		-43,8	70	1 037,9	64,0
0:00:00	21.01.2023	3	20,00		-43,3	70	1 044,4	64,0
0:00:00	22.01.2023	10	4,00	слаб. снег {метель}	-24,7	65	1 030,2	63,0
0:00:00	23.01.2023	10	20,00	сильный позёмок {м	-24,6	70	1 020,7	56,0
0:00:00	24.01.2023	0	20,00		-37,8	70	1 018,0	56,0
0:00:00	25.01.2023	6	20,00	позёмок {метель}	-30,1	76	1 008,9	56,0
0:00:00	26.01.2023	8	4,00	слаб. ливневой снег	-21,5	80	993,6	49,0
0:00:00	27.01.2023	10	10,00	сильный позёмок {м	-22,8	80	987,0	55,0
0:00:00	28.01.2023	8	10,00	позёмок {метель}	-21,0	80	990,8	57,0
0:00:00	29.01.2023	6	20,00	позёмок {снег, мете}	-20,9	80	994,5	57,0
0:00:00	30.01.2023	3	20,00		-32,9	70	1 000,0	56,0

Рис. 2. Фрагмент таблицы данных о значениях климатических факторов

Значения климатических факторов по дате измерений были сопоставлены с данными инклинометров, установленными на одном из объектов ПАО «ГМК «Норильский никель», всего – 4 217 измерения (рис. 3). Таким образом, были сформированы статистические данные по отклонению фундаментов зданий и сооружений и климатических факторов. Интересующее нас событие (выходной параметр) – это угол наклона конструкции объекта. Факторами (входными параметрами), которые оказывают влияние на процессы отклонения, являются следующие: средняя скорость ветра, видимость, температура воздуха, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, высота снежного покрова. В результате эти параметры в дальнейшем позволят получить вид зависимости угла отклонения здания от климатических факторов.

ИД устройства	Наименование устройства	Тип	Дата показаний	Среднее значение за день
INC1401	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	0,130
INC1402	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	-0,360
INC1402	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-0,250
INC1403	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	-1,190
INC1403	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	0,980
INC1404	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	-1,160
INC1404	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-0,360
INC1405	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-1,300
INC1405	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	0,460
INC1406	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	0,130
INC1406	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-0,550
INC1407	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-0,040
INC1407	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	-1,350
INC1408	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-0,840
INC1408	ДИ 15 RS-485	X	01.01.2022	-0,230
INC1401	ДИ 15 RS-485	Y	01.01.2022	-1,230
INC1401	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-0,360
INC1402	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	0,130
INC1402	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-1,190
INC1403	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-0,250
INC1403	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	0,980
INC1404	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-1,160
INC1404	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	-0,360
INC1405	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-1,300
INC1405	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	0,130
INC1406	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	0,460
INC1406	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	-0,550
INC1407	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-0,040
INC1407	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	-0,840
INC1408	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	-1,350
INC1408	ДИ 15 RS-485	X	02.01.2022	-0,230
INC1401	ДИ 15 RS-485	Y	02.01.2022	-1,230
INC1401	ДИ 15 RS-485	X	03.01.2022	-0,360
INC1402	ДИ 15 RS-485	X	03.01.2022	0,130
INC1402	ДИ 15 RS-485	Y	03.01.2022	-0,250
INC1403	ДИ 15 RS-485	X	03.01.2022	-1,190
INC1403	ДИ 15 RS-485	Y	03.01.2022	0,980

Рис. 3. Фрагмент таблицы данных, полученных измерительными приборами

Результаты исследования и их обсуждение

Данные о распределении частот значений отклонений, полученных на основе измерений инклинометра, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что нет определенного закона и очевидной зависимости. Так, например, для того, чтобы продемонстрировать влияние климатических факторов на отклонение конструкции зданий и сооружений, на рис. 5–7 приведено распределение значений, измеренных инклинометрами для трех параметров в отдельности.

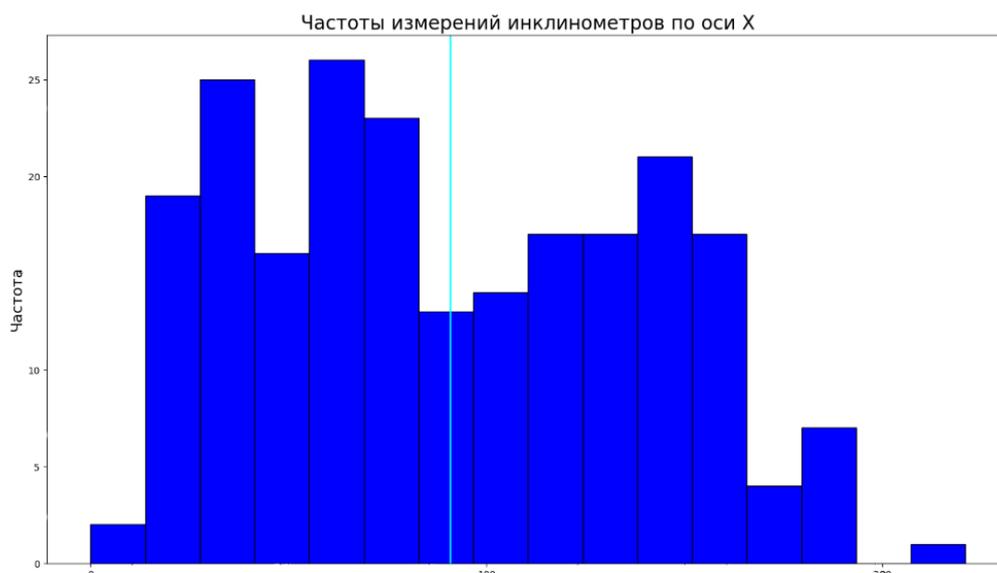


Рис. 4. Распределение частот измерений инклинометра

На основе метода наименьших квадратов [12] была произведена оценка коэффициентов линейной зависимости влияния одного из климатических факторов на угол отклонения конструкции здания.

Так, например, аналитическая зависимость влияния температуры (t) на угол наклона конструкции (x) имеет следующий вид:

$$t = 48,41 + 119,41 x.$$

Коэффициент корреляции получили равный 92 %, что говорит о достаточно тесной связи температуры и отклонений конструкции зданий [13]. Действительно, изменение температуры окружающей среды играет одну из ключевых ролей для состояния зданий. Такой параметр, как температура, является фактором, оказывающим влияние и на ряд других процессов (например, таяние мерзлых пород, изменение водного режима, расширение и сжатие грунта, для некоторых районов – появление талых торфяников и на изменение тепловых потоков). Поэтому для учета в общей модели определения угла отклонения здания показатель температуры является основным параметром.

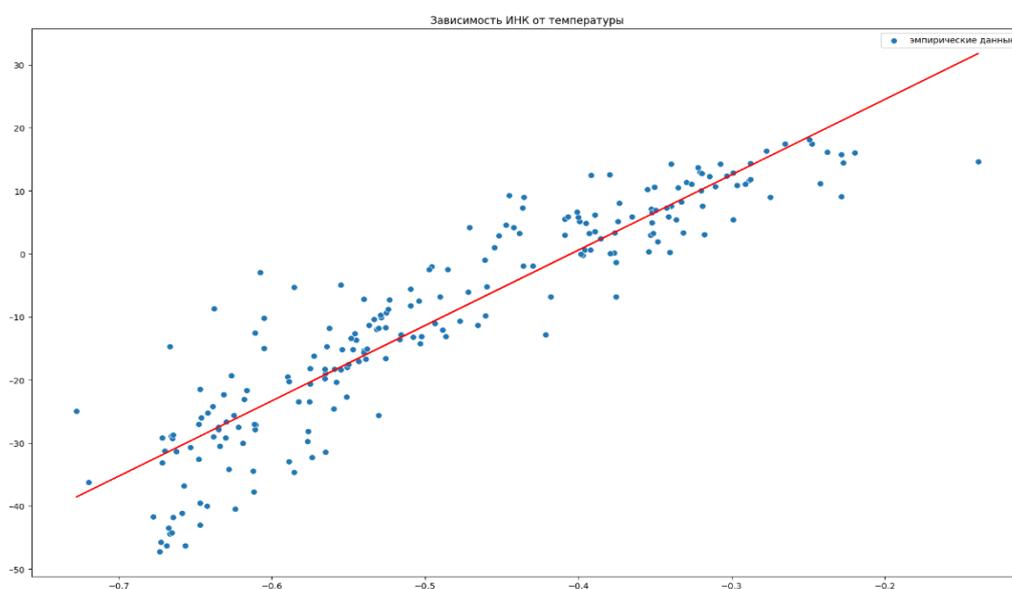


Рис. 5. График корреляции температуры и отклонений инклинометра

Аналитическая зависимость влияния высоты снежного покрова (h) на угол наклона конструкции (x) имеет следующий вид:

$$h = -6,33 - 127,01 x.$$

Коэффициент корреляции получили равный 84 %, что говорит также о явной линейной связи между высотой снежного покрова и отклонениями здания. Рассматриваемый фактор так же, как и температура, может оказывать существенное влияние на образование других условий. В частности: на увеличение давления на грунт, на изменение условий мерзлого грунта, на возможность образования ледяных линз (создается механическое напряжение в грунте), кроме этого, для некоторых территорий – на увеличение риска схода снежных лавин (механическое воздействие на здание) и даже на увеличение риска наводнения при сходе снега. Приведенные данные на рис. 6 свидетельствуют о том, что необходимо исследовать влияние данного фактора на угол отклонения.

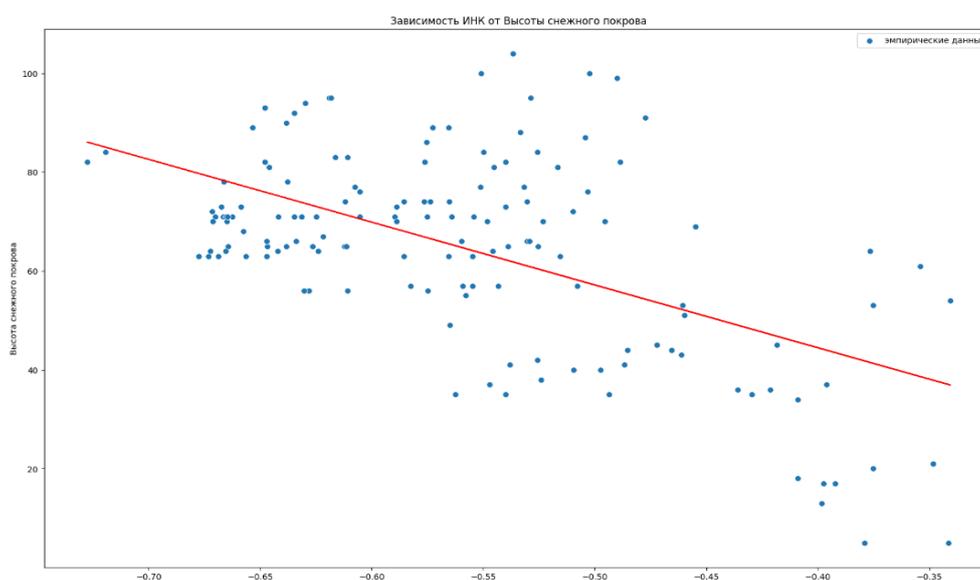


Рис. 6. График корреляции высоты снежного покрова и отклонений инклинометра

Данные, приведенные на рис. 7, свидетельствуют о низкой линейной корреляции скорости ветра и значений отклонений, полученных инклинометром. Значение корреляции составило около 8 %. Скорость ветра является в большей мере параметром, оказывающим опосредованное влияние на другие факторы. Например, механическое воздействие на конструкцию здания, ветровые нагрузки, может влиять на теплопотери здания и провоцировать снежные заносы. Поэтому учет скорости ветра возможен в совокупности с температурой окружающей среды и снежными заносами.

Аналитическая зависимость влияния скорости ветра (v) на угол наклона конструкции (x) имеет следующий вид:

$$v = 3,51 - 2,02 x.$$

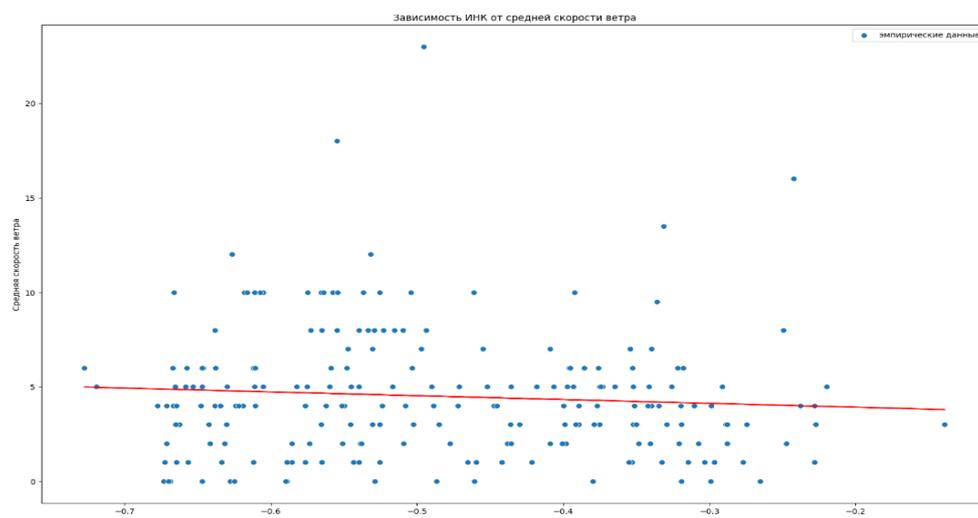


Рис. 7. График корреляции скорости ветра и отклонений инклинометра

В соответствии с имеющимися данными (фрагмент таблицы приведен на рис. 2) в нашем распоряжении имеются значения по шести климатическим факторам, перечисленным выше. Для проведения факторного анализа необходимо вычислить корреляционную матрицу между всеми параметрами, по которым имеются статистические данные, что позволяет определить степень взаимосвязи между ними (рис. 8). Элементами этой матрицы являются значения парных корреляций между рассматриваемыми параметрами, которые вычисляются по следующей формуле [14]:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{4217} ((x_i - M_X)(y_i - M_Y))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{4217} ((x_i - M_X)^2 (y_i - M_Y)^2)}}$$

где x_i – значения, принимаемые параметром X; y_i – значения, принимаемые параметром Y; M_X – математическое ожидание параметра X; M_Y – математическое ожидание параметра Y.

Вычисленные значения между углом наклона здания и средней скоростью ветра, видимостью, температурой воздуха, относительной влажностью воздуха, атмосферным давлением, высотой снежного покрова приведены на рис. 8. В результате вычислений парных корреляций получили значительное влияние на изменения угла наклона здания (на рис. 8 – это обозначено как среднее за день) трех параметров: температура (корреляция 92 %), высота снежного покрова (корреляция 84 %) и относительная влажность воздуха (корреляция 38 %).

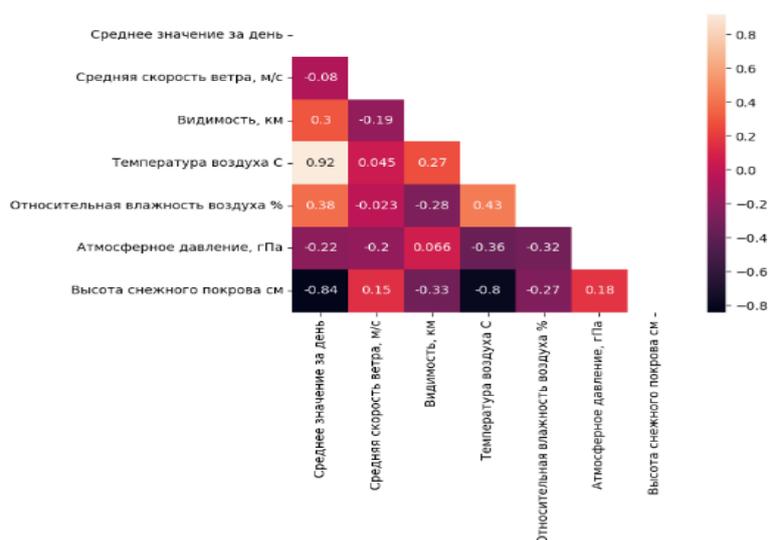


Рис. 8. Корреляционная матрица между рассматриваемыми параметрами

Полученные значения парных корреляций [15] позволяют включить в дальнейшее рассмотрение три основных климатических фактора. Также применяя данные таблицы, фрагмент которой приведен на рис. 2, был проведен регрессионный анализ, который позволил получить аналитическую зависимость угла наклона здания (α) от температуры t , высоты снежного покрова (h) и относительной влажности воздуха (w).

Вид математической зависимости был определен исходя из взаимовлияния факторов между собой [5]. В результате за основную модель был выбран полином третьей степени, который аналитически выражается следующим образом:

$$\alpha(t, h, w) = \left(81 \cdot t + 0,1 \cdot w - 24 \cdot h - 0,1 \cdot t \cdot w - t \cdot h + 0,2 \cdot h \cdot w \right) \cdot 10^{-4} + 0,01 \cdot t \cdot h \cdot w - 4131 \quad (1)$$

Получили множественный коэффициент корреляции, равный 93 %.

На рис. 9 приведены результаты оценки погрешности модели (1): был произведен расчет для 215 точек, компонентами которых являются температура t ($^{\circ}\text{C}$), высота снежного покрова h (см) и относительная влажность воздуха w (%). Значение погрешности составило 5 %.

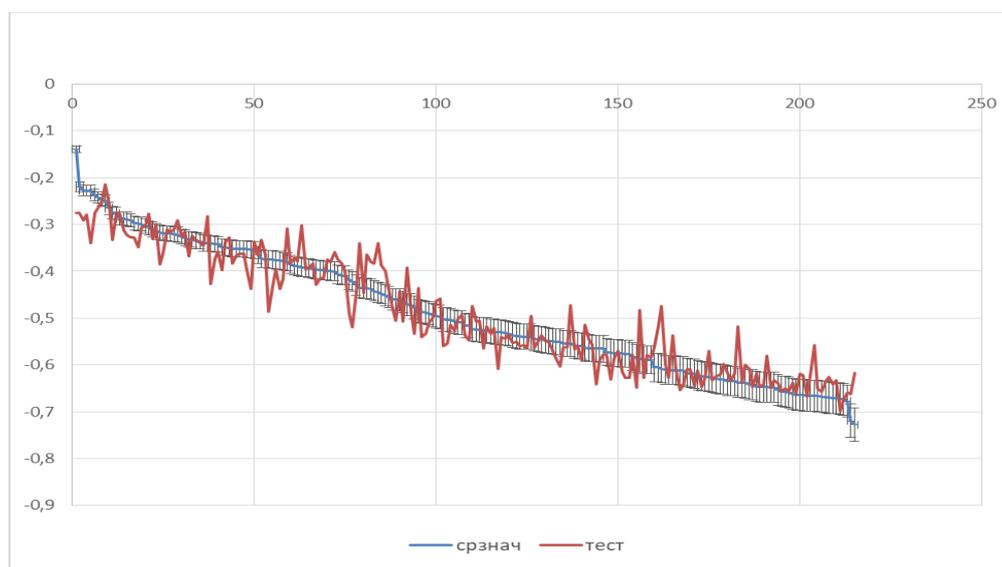


Рис. 9. Отклонение значений, полученных по модели (1), от среднего значения

Можно сделать вывод, что за счет применения методов корреляционно-регрессионного анализа при обработке статистических данных возможно выявление значимых связей между основными показателями, характеризующими состояние зданий, сооружений и изменяющимися параметрами окружающей среды.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ данных измерительных приборов (инклинометр) позволил получить аналитическую зависимость изменения угла наклона здания, расположенного в вечной мерзлоте, от значимых климатических факторов. Такая модель в дальнейшем может быть применена для прогноза состояния здания и сооружения в зависимости от изменения климатических условий, что, в свою очередь, будет являться обоснованием защитных инженерно-технических мероприятий для обеспечения устойчивости таких объектов. Тем самым полученная модель является основой для дальнейшего расчета необходимых объемов мероприятий защиты, направленных на снижение возможного ущерба от чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, расположенных в зоне вечной мерзлоты, и времени для их реализации.

Список источников

1. CAN/CSA-S501–14. National Standard of Canada Moderating the effects of permafrost degradation on existing building foundations. URL: <https://climatechange.toolkitnwtac.com/wp-content/uploads/sites/21/2018/06/Moderating-Permafrost-Degradation-Standard.pdf> (дата обращения: 18.03.2024).
2. Regulations on technical requirements for building works. 2019. URL: <https://www.dibk.no/globalassets/byggeregler/regulation-on-technical-requirements-for-construction-works--technical-regulations.pdf> (дата обращения: 18.03.2024).
3. CSA PLUS 4011.1–2019. Technical Guide: Design and construction considerations for foundations in permafrost regions. URL: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=CSA%20PLUS%204011.1&item_s_key=00797156 (дата обращения: 18.03.2024).
4. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326?ysclid=ltxc8u1w97253215535> (дата обращения: 18.03.2024).
5. Contradictions of the content and form of construction structures on permafrost / V.V. Passek [et al.] // *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2020. № 4–5. P. 49–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-49-55.
6. Landers K., Streletskiy D. (Un)frozen foundations: A study of permafrost construction practices in Russia, Alaska, and Canada // *Ambio*. 2023. № 52 (7). P. 1170–1183. DOI: 10.1007/s13280-023-01866-9.
7. Юрченко В.А., Манько А.В. Вечная мерзлота: геокриологические опасности и региональная деградация мерзлых грунтов // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 8 (104). С. 1–9.
8. Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК России в Арктике как следствие повышения среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны / В.П. Мельников [и др.] // *Вестник РАН*. 2022. Т. 92. № 4. С. 303–314.
9. Богданов И.С. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений в условиях криолитозоны // *Фундаменты*. 2022. № 1 (7). С. 14–15.
10. Kornilov T.A., Nikiforov A.Yu., Rabinovich M.V. Monitoring of Permafrost Foundation-Bed Soils of Low-Rise Buildings Having Unvented Underfloor Spaces // *Soil Mech Found Eng*. 2020. № 57. P. 336–342. DOI: 10.1007/s11204-020-09675-y.
11. Syas'ko V., Shikhov A. Assessing the State of Structural Foundations in Permafrost Regions by Means of Acoustic Testing // *Appl. Sci*. 2022. № 12. P. 2364. DOI: 10.3390/app12052364.
12. Метод наименьших квадратов: методические указания / сост.: Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 32 с.
13. Richard B. Darlington Andrew F. Hayes Regression Analysis and Linear Models // The Guilford Press. New York London. 2017. 661 p.
14. Мазуров Б.Т., Падве В.А. Метод наименьших квадратов (статика, динамика, модели с уточняемой структурой) // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2017. Т. 22. № 2. С. 22–35.
15. Özer Mahmut, Suna H. The Impact of School Tracking on Secondary Vocational Education and Training in Turkey // *Hacettepe University Journal of Education*. 2021. P. 1–16. DOI: 10.16986/HUJE.2021068158.

References

1. CAN/CSA-S501–14. National Standard of Canada Moderating the effects of permafrost degradation on existing building foundations. URL: <https://climatechange.toolkitnwtac.com/wp-content/uploads/sites/21/2018/06/Moderating-Permafrost-Degradation-Standard.pdf> (data obrashcheniya: 18.03.2024).

2. Regulations on technical requirements for building works. 2019. URL: <https://www.dibk.no/globalassets/byggeregler/regulation-on-technical-requirements-for-construction-works--technical-regulations.pdf> (data obrashcheniya: 18.03.2024).
3. CSA PLUS 4011.1–2019. Technical Guide: Design and construction considerations for foundations in permafrost regions. URL: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=CSA%20PLUS%204011.1&item_s_key=00797156 (data obrashcheniya: 18.03.2024).
4. SP 25.13330.2020. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlyh gruntah. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326?ysclid=ltxc8u1w97253215535> (data obrashcheniya: 18.03.2024).
5. Contradictions of the content and form of construction structures on permafrost / V.V. Passek [et al.] // *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. № 4–5. P. 49–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-49-55.
6. Landers K., Streletskiy D. (Un)frozen foundations: A study of permafrost construction practices in Russia, Alaska, and Canada // *Ambio*. 2023. № 52 (7). P. 1170–1183. DOI: 10.1007/s13280-023-01866-9.
7. Yurchenko V.A., Man'ko A.V. Vechnaya merzlota: geokriologicheskie opasnosti i regional'naya degradaciya merzlyh gruntov // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2023. № 8 (104). S. 1–9.
8. Snizhenie ustojchivosti infrastruktury TEK Rossii v Arktike kak sledstvie povysheniya srednegodovoy temperatury pripoverhnostnogo sloya kriolitozony / V.P. Mel'nikov [i dr.] // *Vestnik RAN*. 2022. T. 92. № 4. S. 303–314.
9. Bogdanov I.S. Inzhenernaya zashchita territorij, zdaniy i sooruzhenij v usloviyah kriolitozony // *Fundamenti*. 2022. № 1 (7). S. 14–15.
10. Kornilov T.A., Nikiforov A.Yu., Rabinovich M.V. Monitoring of Permafrost Foundation-Bed Soils of Low-Rise Buildings Having Unvented Underfloor Spaces // *Soil Mech Found Eng*. 2020. № 57. P. 336–342. DOI: 10.1007/s11204-020-09675-y.
11. Syas'ko V., Shikhov A. Assessing the State of Structural Foundations in Permafrost Regions by Means of Acoustic Testing // *Appl. Sci*. 2022. № 12. P. 2364. DOI: 10.3390/app12052364.
12. Metod naimen'shikh kvadratov: metodicheskie ukazaniya / sost.: L.V. Kolomic, N.Yu. Ponikarova. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2017. 32 s.
13. Richard B. Darlington Andrew F. Hayes Regression Analysis and Linear Models // The Guilford Press. New York London. 2017. 661 p.
14. Mazurov B.T., Padve V.A. Metod naimen'shikh kvadratov (statika, dinamika, modeli s utochnyaemoj strukturoj) // *Vestnik SGUGiT* (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij). 2017. T. 22. № 2. S. 22–35.
15. Özer Mahmut, Suna H. The Impact of School Tracking on Secondary Vocational Education and Training in Turkey // *Hacettepe University Journal of Education*. 2021. P. 1–16. DOI: 10.16986/HUJE.2021068158.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.06.2024; одобрена после рецензирования: 18.07.2024;
принята к публикации: 23.09.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 23.06.2024; approved after review: 18.07.2024;
accepted for publication: 23.09.2024

Информация об авторах:

Рыбаков Анатолий Валерьевич, профессор кафедры высшей математики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), доктор технических наук, профессор, e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/000-0002-4037-1231>, SPIN-код: 8654-3788

Иванов Евгений Вячеславович, доцент кафедры аварийно-спасательных работ Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), кандидат технических наук, e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/000-0002-9093-1559>, SPIN-код: 5470-1533

Леонтьев Александр Викторович, аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (420126, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Четаева, д. 18а), e-mail: av.leontiev@yandex.ru

Мурavyева Елена Викторовна, заведующий кафедрой экологической и промышленной безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (420126, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Четаева, д. 18а), доктор педагогических наук, профессор, e-mail: el-kazan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0547-6417>, SPIN-код: 5082-6256

Information about the authors:

Rybakov Anatoliy V., professor of the department of higher mathematics of the Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), doctor of technical sciences, professor, e-mail: a.rybakov@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/000-0002-4037-1231>, SPIN: 8654-3788

Ivanov Evgeniy V., associate professor of the department of emergency rescue operations of the Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), candidate of technical sciences, e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/000-0002-9093-1559>, SPIN: 5470-1533

Leontiev Alexandr V., postgraduate student of Kazan national research technical university of A.N. Tupolev (420126, Republic of Tatarstan, Kazan, Chetaeva str., 18a), e-mail: av.leontiev@yandex.ru

Muravyeva Elena V., head of the department of environmental and industrial safety of the Kazan national research technical university of A.N. Tupolev (420126, Republic of Tatarstan, Kazan, Chetaeva str., 18a), doctor of pedagogical sciences, professor, e-mail: el-kazan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0547-6417>, SPIN: 5082-6256