

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-81-92](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-81-92)
УДК 624.139

EDN: PJNFYA

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ИХ ДЕГРАДАЦИИ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКОМ ПОТЕПЛЕНИИ

А.Г. АЛЕКСЕЕВ^{1,2,✉}, д-р техн. наук
П.М. САЗОНОВ¹
В.Г. РЯБУХИНА¹

¹ Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсевича «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Происходящие климатические изменения в криолитозоне, связанные с глобальным потеплением, оказывают серьезные воздействия на температурный режим и глубину сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов. В принятой практике проектирования при расчетах фундаментов принимается постоянная расчетная величина глубины сезонного оттаивания, хотя в реальности она меняется и может превысить проектные значения. Действующие нормативные требования по проектированию не учитывают данное изменение, что подтверждает актуальность проведенного исследования.

Цель. Разработка методики прогнозирования изменения мощности слоя сезонного оттаивания в зависимости от климатических параметров, изменяющихся при потеплении.

Материалы и методы. Анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, архивных данных метеорологических станций России, определение зависимости изменения глубины сезонного оттаивания от времени, разработка методики прогнозирования изменения мощности слоя сезонного оттаивания в зависимости от климатических параметров, изменяющихся при потеплении, и предложения по использованию результатов при разработке нормативно-технических документов.

Результаты. Глубина сезонного оттаивания существенно влияет на стоимость и объемы работ по возведению фундаментов и планировке территории. Существующая методика расчета не позволяет учесть тенденции изменения климата. На территории криолитозоны России происходит повышение температуры грунтов и увеличение глубин сезонного оттаивания. Наибольшая сходимость результатов расчета с натурными наблюдениями получена при расчетах в теплотехнической программе Борей 3D с учетом изменения климата.

Выводы. Глубину оттаивания следует определять в теплотехнической программе с учетом изменения климата. Определение глубины заложения подошвы фундамента, прочностные и деформационные расчеты следует проводить с учетом изменения глубины оттаивания в процессе эксплуатации и влияния глобального потепления.

Ключевые слова: многолетнемерзлый грунт, сезонно-талый слой, глобальное потепление, теплотехнический расчет, температура грунтов

Для цитирования: Алексеев А.Г., Сазонов П.М., Рябухина В.Г. Методика прогнозирования значений сезонно-талого слоя в районах распространения многолетнемерзлых грунтов с учетом их деградации при климатическом потеплении. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;43(4):81–92. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-81-92](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-81-92)

Вклад авторов

Алексеев А.Г. – научное руководство.

Сазонов П.М. – постановка задачи, общее руководство.

Рябухина В.Г. – проведение исследования, написание статьи.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.11.2024

Поступила после рецензирования 02.12.2024

Принята к публикации 05.12.2024

METHODOLOGY FOR FORECASTING THE VALUES OF SEASONAL THAW LAYER IN PERMAFROST AREAS CONSIDERING THEIR DEGRADATION UNDER CLIMATE WARMING

A.G. ALEKSEEV^{1,2,✉}, Dr. Sci. (Engineering)

P.M. SAZONOV¹

V.G. RYABUKHINA¹

¹Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. The ongoing climate changes in the permafrost zone associated with global warming significantly impact the temperature regime and the depth of seasonal thawing of permafrost soils. In current design practices, a constant calculated value for the depth of seasonal thawing is adopted; however, in reality, it varies and may exceed the design values. Existing regulatory requirements for design neglect this variation, which underscores the relevance of the study.

Aim. To develop a methodology for forecasting changes in the thickness of the seasonal thaw layer based on climate parameters altering with warming.

Materials and methods. The methodology of the study involved an analysis of contemporary scientific and technical literature, regulatory documents, methodological literature, and archival data from meteorological stations across Russia; determination of the relationship between changes in the depth of seasonal thawing over time; development of a forecasting methodology for changes in the thickness of the seasonal thaw layer based on climate parameters affected by warming; recommendations for utilizing the results in the development of regulatory and technical documents.

Results. The depth of seasonal thawing significantly affects the cost and scope of foundation construction and land planning works. The existing calculation methodology fails to account for climate change trends.

The permafrost zone of Russia displays an increase in the temperature of soils and the depth of seasonal thawing. The highest convergence of calculated results with field observations was achieved using the Borey 3D heat engineering program while considering climate change.

Conclusions. The depth of thawing is to be determined using a heat engineering program that accounts for climate change. Determination of the foundation bottom depth, as well as strength and deformation calculations, are to consider changes in thaw depth during operation and the impact of global warming.

Keywords: permafrost soil, seasonal thaw layer, global warming, thermotechnical calculation, soil temperature

For citation: Alekseev A.G., Sazonov P.M., Ryabukhina V.G. Methodology for forecasting the values of seasonal thaw layer in permafrost areas considering their degradation under climate warming. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):81–92. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-81-92](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-81-92)

Authors contribution statement

Alekseev A.G. – academic advising.

Sazonov P.M. – problem statement, general guidance.

Ryabukhina V.G. – conducting research, writing the article.

Funding

The study was carried out within the framework of contractual works of JSC Research Center of Construction and Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment in Construction (FAU "FCC").

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.11.2024

Revised 02.12.2024

Accepted 05.12.2024

Введение

Происходящие климатические изменения в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, связанные с глобальным потеплением климата, оказывают серьезные воздействия на природные, хозяйственные и социальные системы российской криолитозоны. Как показали результаты комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проведенных НИИОСП им. Н. М. Герсеева [1], температурный режим грунтов повышается, что приводит к увеличению глубины сезонного оттаивания. Наиболее значимым фактором, оказывающим негативное влияние на состояние многолетнемерзлых грунтов, является повышение температуры, происходящее по различным причинам, таким как естественное повышение температуры приземного воздуха, изменение почвенно-растительного и снежного покровов, техногенное влияние.

Значение глубины сезонного оттаивания широко используется при проектировании оснований и фундаментов в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Неправильное определение глубины оттаивания может привести к деформированию фундаментов зданий и сооружений. Например, в случае свайного фундамента – к увеличению касательных сил морозного пучения грунтов, в случае плитного фундамента – к неучтенному оттаиванию грунтов под подошвой фундамента, возникновению нормальных сил пучения грунтов.

Это делает актуальной задачу по разработке методики прогнозирования мощности сезонно-талого слоя в районах распространения многолетнемерзлых грунтов с учетом их деградации при климатическом потеплении.

В рамках НИР выполнено следующее:

- обзор и анализ современной научно-технической, нормативной и методической литературы, в том числе нормативных требований и расчетов, в которых используется значение глубины сезонного оттаивания;
- обзор и анализ архивных данных по замерам температуры грунтов и замерам глубины слоя сезонного оттаивания;
- проведение расчетов по существующей инженерной методике и теплотехнических прогнозных расчетов с учетом сценариев изменения климата, анализ и сопоставление полученных результатов с архивными данными;
- оценка влияния глубины оттаивания на проектирование оснований и фундаментов в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, в том числе на глубину заложения фундамента, несущую способность свай и на действие сил морозного пучения грунтов;
- разработка методики прогнозирования изменения мощности слоя сезонного оттаивания в зависимости от климатических параметров на основании анализа полученных данных;
- разработка предложений по внесению изменений в существующую нормативную документацию.

Обзор и анализ современной научно-технической, нормативной и методической литературы

Существующая инженерная методика определения глубины сезонного оттаивания, представленная в СП 25.13330.2020 [2], учитывает текущие климатические параметры по СП 131.13330.2020 [3], которые рассчитаны за период 1998–2018 гг.

Наблюдаемая тенденция повышения приземной температуры воздуха начиная с 1960-х годов оказывает влияние на формирование температурного режима и глубины сезонно-талого слоя грунтов в криолитозоне, о чем указывает в своей статье А.В. Павлов [4], при этом низкотемпературные мерзлые грунты претерпевали бóльшие изменения, чем высокотемпературные, что подтверждается в статье С.П. Варламова [5].

В статьях П.П. Гаврильева [6, 7] рассматривается влияние потепления климата на грунты в Центральной Якутии и подтверждается, что на естественных ландшафтах вплоть до 2007 года наблюдается незначительное изменение геофизиологических условий несмотря на значительное повышение среднегодовых температуры приземного воздуха (на 1,5–2 °С). Однако в зонах сельскохозяйственных ландшафтов наблюдается как повышение температуры грунтов на 1,5–2 °С, так и резкое увеличение глубины сезонного оттаивания на 3–16 см в год, что привело к образованию зон несливающейся мерзлоты. Негативное влияние на температурный режим грунтов антропогенного фактора также описывает А.Х. Сариев [8].

Анализ современных наблюдений, описанных в статьях Н.Д. Самохвалова [9], С.А. Белецан [10], С.П. Варламова [11], Е.А. Бабиной [12], А.А. Маслакова [13], показывает сохранение тренда повышения температуры грунтов и увеличения глубины сезонного оттаивания со временем из-за меняющихся климатических факторов.

Также в перечисленных источниках отмечается значительное влияние на формирование температурного режима грунтов, характера и мощности снегонакопления, влажности и структуры грунтов, наличия и типа растительности на поверхности.

Наименьшие изменения глубин сезонного оттаивания характерны для болотистой местности за счет застойного водного режима и, как следствие, повышенной льдистости поверхностных грунтов. Наибольшие изменения наблюдаются в сухих песках: до 49 см за период с 1975 по 2022 год [9].

По результатам наблюдений в г. Салехарде отмечено сильное влияние снежного покрова. В период с 2016 по 2018 год глубина сезонного талого слоя практически не менялась, а в 2019–2020 годах произошло резкое увеличение глубины оттаивания на 10–35 см, что обусловлено аномальными осадками высотой, превышающей предыдущий период наблюдений почти в 2 раза [10].

В статье [11] отмечается охлаждающее влияние на грунты вследствие затенения поверхности участка исследования за счет разрастания деревьев и кустарников.

В источнике [13] представлены результаты комплексного исследования параметров сезонно-талого слоя в районе Восточной Чукотки. В рамках работы выполнялись измерения температуры и влажности грунтов, глубины оттаивания и деформаций поверхности на двух площадках в период с 2000 по 2019 год. Скорость увеличения глубины оттаивания составила 0,7–1,8 см в год, при этом отмечено, что величина осадки почвы при оттаивании не компенсировалась за счет морозного пучения грунтов в зимний период и имела накопительный эффект. Средние осадки поверхности составили 2,2 см в год.

В своей работе С. Н. Булдович [14] предлагает методику расчета для оценки риска увеличения слоя оттаивания и возможности начала деградации многолетнемерзлых грунтов за счет техногенного воздействия на геокриологические условия. Описанная методика применима для предварительной оценки изменения состояния многолетнемерзлых грунтов при воздействии различных внешних фактов.

В статье А. Г. Алексеева [15] приведен сравнительный анализ методик расчета глубины сезонного промерзания грунта. Наиболее достоверные результаты расчетов получены по методикам, в которые заложена формула Стефана с учетом снежного покрова.

Обзор отечественных работ по вопросу расчета глубины сезонного оттаивания позволяет сделать следующие выводы:

1. Глубина сезонного оттаивания является важным параметром при проектировании оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах. Данный параметр участвует в прочностных расчетах, влияет на отметку заглубления фундаментов, определяет величину касательных сил морозного пучения грунтов, мощность отсыпки и другие параметры. Таким образом, глубина оттаивания существенно влияет на стоимость и объемы работ по возведению фундаментов и планировке территории. В настоящее время в принятой практике проектирования при расчетах принимается постоянная расчетная величина глубины сезонного оттаивания, хотя в реальности она меняется из-за влияния глобального потепления и может превысить проектные значения. Действующие нормативные требования по проектированию не учитывают данное изменение.

2. При анализе нормативной базы по проектированию на основаниях, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, выявлено, что методика расчета, представленная в СП 25.13330.2020 [2], не позволяет учесть существующие тенденции изменения климатических параметров.

3. Многочисленные исследования в различных регионах севера Российской Федерации свидетельствуют о повышении температуры многолетнемерзлых грунтов и увеличении глубины сезонного оттаивания вследствие изменения климатических условий и техногенного фактора.

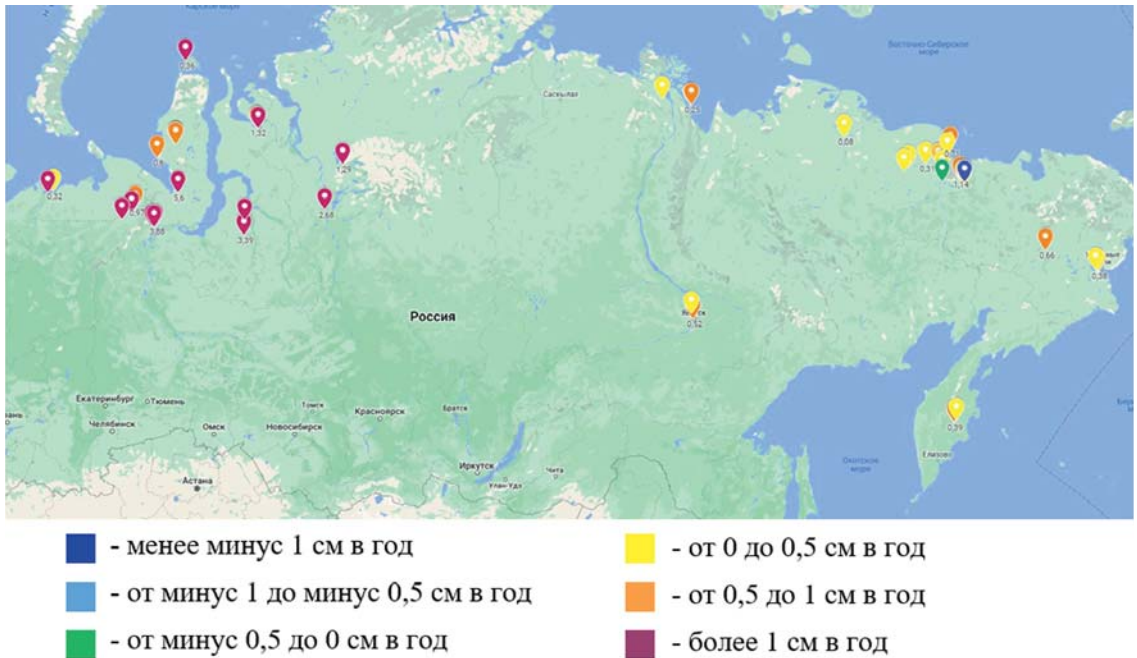


Рис. 2. Карта с указанием среднегодовых изменений глубины сезонного оттаивания
Fig. 2. Map showing the average annual changes in the depth of seasonal thawing

Для анализа динамики изменения мощности сезонно-талого слоя выбрано 53 наблюдательных полигона, в которых выполнено не менее 5 замеров.

На основании линейного анализа данных получены значения среднегодовых изменений глубины слоя сезонного оттаивания. В большинстве пунктов выявлено увеличение слоя сезонного оттаивания за период наблюдений. Максимальный тренд отмечен в научно-исследовательской стационаре «Еркута» и составляет 5,6 см в год, минимальный – на метеостанции Родинка и составляет минус 1,03 см в год. Средний тренд на территории криолитозоны Российской Федерации составляет 1 см в год.

На рис. 2 приведена карта с указанием среднегодовых изменений глубины сезонного оттаивания, вычисленных по линейному тренду за весь период наблюдений.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что на территории криолитозоны Российской Федерации происходят существенные изменения геофизиологических условий, что выражается в повышении температуры грунтов и увеличении глубин сезонного оттаивания.

Методика прогнозирования мощности слоя сезонного оттаивания грунта во времени с учетом изменения климата

В рамках работы проведено 80 расчетов по существующей инженерной методике определения глубины сезонного оттаивания, 160 расчетов в теплотехнической программе при стационарном климатическом режиме и с учетом трех сценариев изменения температуры приземного воздуха, согласно данным Климатического центра Росгидромета [16], для четырех типов грунта: песка, супеси, суглинка и глины.

Проведена оценка влияния глубины оттаивания грунта на проектирование оснований и фундаментов в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Рассмотрено влияние глубины оттаивания на следующие аспекты проектирования:

- определение глубины заложения фундамента;
- расчет несущей способности висячей сваи;
- расчет на действие сил морозного пучения грунтов.

В качестве репрезентативных на рис. 3 приведены графики изменения глубины сезонного оттаивания грунта для вахтового поселка Бованенково, полученные по результатам тепло-технического расчета в программном комплексе с учетом различных сценариев изменения климата.

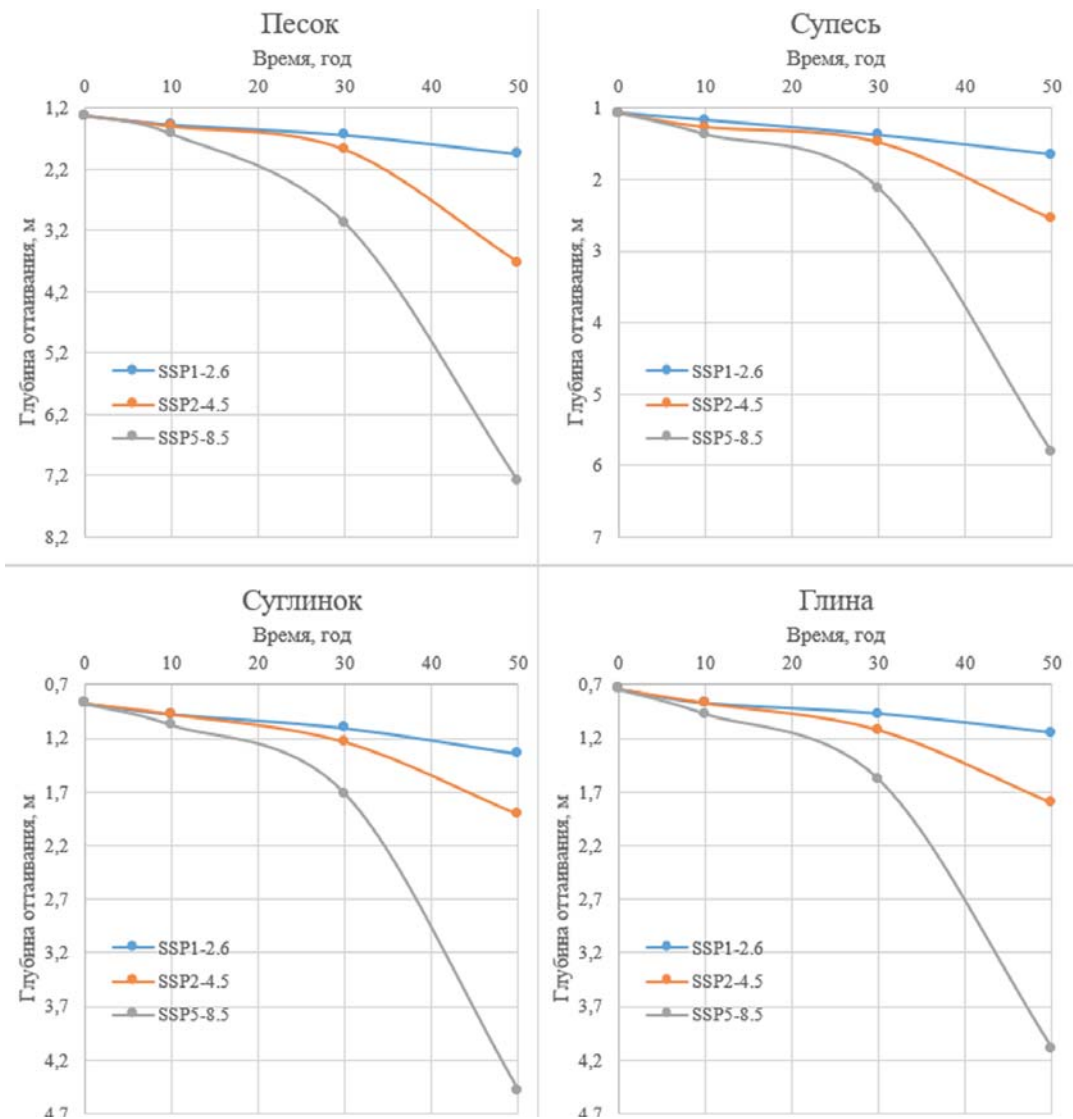


Рис. 3. Графики изменения глубины оттаивания грунта, п. Бованенково (Российская Федерация)
Fig. 3. Graphs showing changes in soil thaw depth, Bovanenkovо (Russian Federation)

По результатам анализа полученных данных сделан вывод, что при температуре грунтов на глубине нулевых амплитуд ниже минус 4 °С существующая расчетная методика СП 25.13330.2020 [2] показывает большую глубину оттаивания, чем при расчетах в теплотехнической программе. Однако при температуре грунтов на глубине нулевых амплитуд выше минус 4 °С большая глубина оттаивания получена при расчетах в теплотехнической программе с учетом сценариев изменения климата.

Опираясь на полученные данные, при температуре грунтов на глубине нулевых амплитуд выше минус 4 °С на стадии проектирования рекомендуется определять глубину оттаивания как по существующей инженерной методике, так и с помощью моделирования в теплотехнической программе с учетом тренда повышения температуры приземного воздуха.

Анализ показал, что наибольшая сходимость результатов расчета с натурными наблюдениями получена при расчетах со сценарием изменения климата SSP1-2.6.

Для расчетов оснований и фундаментов следует использовать наибольшее значение глубины оттаивания из полученных.

Заложение подошвы фундамента следует определять с учетом изменения глубины оттаивания в процессе эксплуатации и с учетом влияния глобального потепления.

По результатам прочностных расчетов фундаментов получено, что при проектировании по существующей инженерной методике к концу эксплуатации устойчивость фундамента не будет обеспечена, что приведет к недопустимым деформациям и разрушению конструкций сооружения. Следовательно, при выполнении проектных расчетов необходимо учитывать глобальное потепление климата и динамику изменения глубины оттаивания во времени.

Выводы и предложения по внесению изменений в существующую нормативную документацию

Анализ литературы и существующей инженерной методики показал, что глубина сезонного оттаивания является важным параметром при проектировании оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах и существенно влияет на стоимость и объемы работ по возведению фундаментов и планировке территории. Методика расчета, представленная в СП 25.13330.2020 [2], не позволяет учесть существующие тенденции изменения климатических параметров.

Согласно архивным данным, на территории криолитозоны Российской Федерации происходят существенные изменения геоэкологических условий, что выражается в повышении температуры грунтов и увеличении глубин сезонного оттаивания.

Результаты выполненных расчетов глубины оттаивания грунтов показали, что при температуре грунтов на глубине нулевых амплитуд выше минус 4 °С большая глубина оттаивания получена при расчетах в теплотехнической программе с учетом сценариев изменения климата. Наибольшая сходимость результатов расчета с натурными наблюдениями получена при расчетах со сценарием изменения климата SSP1-2.6.

Определение глубины заложения подошвы фундамента, прочностные и деформационные расчеты следует определять с учетом изменения глубины оттаивания в процессе эксплуатации и влияния глобального потепления.

Учитывая полученные результаты НИР, предлагается внести следующее изменение в СП 25.13330.2020 [2]:

«Г. 1 При температурах грунтов на глубине нулевых амплитуд выше минус 4 °С на стадии проектирования следует определять глубину сезонного оттаивания как по инженерной методике по формулам (Г. 1) или (Г. 3), так и с помощью моделирования в теплотехнической программе с учетом тренда повышения температур приземного воздуха по сценарию изменения климата SSP1-2.6 в соответствии с трендом будущих изменений климата на территории России с помощью ансамбля глобальных климатических моделей CMIP6, представленных на официальном сайте Климатического центра Росгидромета.

Для проектирования и расчетов оснований и фундаментов следует использовать наибольшее значение глубины сезонного оттаивания из полученных по результатам расчетов по инженерной методике и в теплотехнической программе с учетом динамики изменения глубины сезонного оттаивания по времени.

При температурах грунтов на глубине нулевых амплитуд ниже минус 4 °С допускается определять глубину сезонного оттаивания только по формулам (Г. 1) или (Г. 3)».

Список литературы

1. Алексеев А.Г., Зорин Д.В. Прогнозирование температурного состояния мерзлых грунтов в связи с изменением климата. Вестник НИЦ «Строительство». 2019;23(4):44–49.
2. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/>
3. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. Москва: Минстрой России; 2020.
4. Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г., Дубровин В.А., Какунов Н.Б., и др. Мониторинг сезонно-талого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России. Криосфера земли. 2002;6(4):30–39.
5. Варламов С.П., Скрябин П.Н. Динамика теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов центральной Якутии. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012;14(1):2040–2044.
6. Гаврильев П.П., Угаров И.С., Ефремов П.В. Криогенные процессы и изменение устойчивости пород ледового комплекса в Центральной Якутии при современном изменении климата. Наука и образование. 2005;(4):84–87.
7. Гаврильев П.П., Угаров И.С. Реакция пород ледового комплекса Центральной Якутии на потепление климата. Криосфера земли. 2009;13(1):24–30.
8. Сариев А.Х., Федина Е.В. Динамика изменения сезонно-талого слоя в условиях промышленного освоения Енисейского Севера. Экология и промышленность России. 2018;18(11):46–50. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-11-46-50>
9. Самохвалов Н.Д., Васильев А.А. Исследования сезонно-талого слоя в типичной тундре Западного Ямала. В: К познанию цельного образа криосферы Земли: изучение природных явлений и ресурсного потенциала Арктики и Субарктики: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, Тюмень, 29–30 ноября 2023 г. Тюмень: ТюмГУ-Press; 2023, с. 61–63.
10. Белецан С.А., Доронкина И.Г. Влияние глубины сезонно-талого слоя на инфраструктуру городов Крайнего Севера. В: Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем (Техносферная безопасность-2023): Материалы XX Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 30–31 мая 2023 г. Уфа: Уфимский университет науки и технологий; 2023, с. 223–227.
11. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Балута В.И. Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023;28(3):398–414. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>
12. Бабкина Е.А., Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Лейбман М.О. Мониторинг глубины протаивания и температуры многолетнемерзлых пород на севере Ямало-Ненецкого АО. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022;(9):20–28. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-20-28>

13. Маслаков А.А., Комова Н.Н. Деградация льдистых отложений приморских равнин Восточной Чукотки при современных климатических условиях. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2019;(6):113–117. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2019-10615>
14. Булдович С.Н. Оценка устойчивости многолетнемерзлых пород к техногенным воздействиям при освоении северных территорий России. Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2012;(1):47–60.
15. Алексеев А.Г. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов инженерными и численными методами. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;(3):56–82. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)
16. Климатический центр Росгидромета [интернет]. Режим доступа: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/> (дата доступа: 10.08.2024);
17. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [интернет]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/> (дата доступа: 01.07.2024).
18. Циркумполярная сеть мониторинга активных слоев – CALM [интернет]. Режим доступа: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (дата доступа: 01.07.2024).

References

1. Alekseev A., Zorin D. Prediction of the thermal state of frozen soils in connection with climate change. Vestnik NIC Stroitel' stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2019;23(4):44–49. (In Russian).
2. SP 25.13330.2020. Soil bases and foundations on permafrost soils. Updated version of SNiP 2.02.04-88 [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/> (In Russian).
3. SP 131.13330.2020. Building climatology. Updated version of SNiP 23-01-99. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2020. (In Russian).
4. Pavlov A.V., Ananyeva G.V., Drozdov D.S., Moskalenko N.G., Dubrovin V.A., Kakunov N.B., et al. Monitoring of the seasonal melt layer and temperature of frozen soil in the north of Russia. Earth's Cryosphere. 2002;5(4):30–39. (In Russian).
5. Varlamov S.P., Scriabin P.N. Dynamics of the soil thermal state in permafrost landscapes in Central Yakutia. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2012;14(1):2040–2044. (In Russian).
6. Gavril'yev P.P., Ugarov I.S., Efremov P.V. Cryogenic processes and changes in the stability of rocks of the ice complex in Central Yakutia under modern climate change. Nauka i Obrazovanie = Science and Education. 2005;(4):84–87. (In Russian).
7. Gavril'yev P.P., Ugarov I.S. Reaction of rocks of the ice complex of Central Yakutia to climate warming. Earth's Cryosphere. 2009;13(1):24–30. (In Russian).
8. Sariev A., Fedina E. Dynamics of Change of the Seasonally Thawing Layer in the Conditions of Industrial Development of the Yenisei North. Ecology and Industry of Russia. 2018;22(11):46–50. (In Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-11-46-50>
9. Samokhvalov N.D., Vasiliev A.A. Studies of the active layer in the typical tundra of Western Yamal. In: Towards the knowledge of the integral image of the Earth's cryosphere: the study of natural phenomena and the resource potential of the Arctic and Subarctic: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Tyumen, November 29–30, 2023 Tyumen: TyumGU-Press; 2023, pp. 61–63. (In Russian).
10. Beletsan S.A., Doronkina I.G. The influence of the seasonal thaw layer depth on the infrastructure of the far North Cities. In: Science, education, production to counter man-made threats and solve environmental problems (Technosphere safety-2023): Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference, Ufa, May 30–31, 2023 Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2023, pp. 223–227. (In Russian).
11. Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N., Baluta V.I. Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2023;28(3):398–414. (In Russian). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>
12. Babkina E.A., Khomutov A.V., Babkin E.M., Leibman M.O. Monitoring of active layer depth and permafrost temperature in the north of Yamal-Nenets AD. Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2022;(9):20–28. (In Russian).

13. *Maslov A.A., Komova N.N.* Degradation of ice-rich deposits of Eastern Chukotka coastal plains during contemporary climate conditions. Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2019;(6):113–117. (In Russian).
14. *Buldovich S.N.* Estimation of stability permafrost rocks against technogenic attack during mastering the north territory of Russia. RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2012;(1):47–60. (In Russian).
15. *Alekseev A.G.* Calculation of seasonal soil freezing depth by engineering and numerical methods. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2024;42(3):56–82. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)
16. The Climate center of Roshydromet [internet]. Available at: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/> / (accessed: 08 October 2024). (In Russian).
17. All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center [internet]. Available at: <http://meteo.ru/data/> / (accessed: 07 January 2024). (In Russian).
18. Circumpolar Active Layer Monitoring Network – CALM [internet]. Available at: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (accessed: 01 July 2024). (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Григорьевич Алексеев , д-р техн. наук, начальник центра геокриологических и геотехнических исследований, НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Andrey G. Alekseev , Cand. Sci. (Engineering), Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Павел Михайлович Сазонов, заведующий сектором проектирования и геокриологических исследований лаборатории механики мерзлых грунтов и расчета оснований (№ 8), НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: sazonov-pm@yandex.ru

Pavel M. Sazonov, Head of the Design and Geocryological Research Sector, Laboratory of Frozen Soil Mechanics and Foundation Calculation Methods (No. 8), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: sazonov-pm@yandex.ru

Вероника Геннадьевна Рябухина, инженер сектора проектирования и геокриологических исследований лаборатории механики мерзлых грунтов и расчета оснований (№ 8), НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: nickadegrik@mail.ru

Veronika G. Ryabukhina, Engineer, Design and Geocryological Research Sector, Laboratory of Frozen Soil Mechanics and Foundation Calculation Methods (No. 8), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: nickadegrik@mail.ru

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author