



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 3, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

УДК 624.139

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Н.С. Никифорова¹, А.В. Коннов²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 02 июня 2021

Принята: 24 июля 2021

Опубликована: 30 сентября 2021

Ключевые слова:

несущая способность свай, многолетнемерзлые грунты, потепление климата, деградация мерзлоты, сезонно-талый слой.

АННОТАЦИЯ

Одной из основных природных систем на территории России, подверженных общемировому потеплению климата, является зона распространения вечной мерзлоты. Изменяется температура многолетнемерзлых пород, увеличивается зона сезонного оттаивания, запускается процесс деградации мерзлоты, оказывающий влияние на прочностные свойства грунтов. Данное исследование было призвано оценить климатические изменения с точки зрения влияния на несущую способность оснований зданий и сооружений на вечной мерзлоте, построенных в 60–80-х гг. по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов. На основании опубликованных архивных и прогнозных данных по скорости увеличения мощности сезонно-талого слоя и трендам увеличения температуры многолетнемерзлых грунтов для семи географических регионов России (север Европейской части, север Западной Сибири, Средняя Сибирь, Якутия, юг Сибири, Прибайкалье и Забайкалье, Северо-Восток России) было определено снижение несущей способности типовой железобетонной сваи (сечением 35×35 см, длиной 10 м). Проведенное исследование показало, что на текущий момент снижение несущей способности свайного основания остается для большинства регионов на среднем уровне (10–20 %), однако к 2050 г. ожидается высокое (>30 %) ее снижение. В программе Frost 3D для условий Норильска было осуществлено численное моделирование температурного распределения в массиве грунта с учетом теплового влияния здания на период до середины XXI в. Полученная значительная осадка грунтов основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта, может привести к возникновению сил отрицательного трения, что необходимо учитывать при расчете свайных фундаментов.

© ПНИПУ

© Никифорова Надежда Сергеевна – доктор технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: n.s.nikiforova@mail.ru, ORCIDID: 0000-0002-0611-4354.

Коннов Артем Владимирович – кандидат технических наук, e-mail: artem.konnov@gmail.com, ORCIDID: 0000-0002-7394-2774.

Nadezhda S. Nikiforova – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: n.s.nikiforova@mail.ru, ORCIDID: 0000-0002-0611-4354.

Artem V. Konnov – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: artem.konnov@gmail.com, ORCIDID: 0000-0002-7394-2774.

PILES BEARING CAPACITY IN PERMAFROST SOILS UNDER CLIMATE CHANGE

N.S. Nikiforova¹, A.V. Konnov²

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

²Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of architecture and construction sciences (NIISF RAACS), Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 June 2021

Accepted: 24 July 2021

Published: 30 September 2021

Keywords:

piler bearing capacity, permafrost soil, climate warming, permafrost degradation, active-layer.

ABSTRACT

The one of the main natural systems in the Russian Federation that are exposed to global warming is the permafrost zone. The temperature of permafrost soils changes, the seasonal thaw zone increases, the process of permafrost degradation is started, influencing the strength characteristics of the soils. The study was aimed to assess the climate change in terms of the impact on the bearing capacity of the soil base under buildings and structures built in the 1960s and 1980s on the Principle I (maintaining the permafrost state of the soil). On the basis of published archival and forecast data on the increase rate in the active layer thickness and the rising temperature trends of permafrost soils for seven geographical regions of Russia (North of the European part, North of Western Siberia, Middle Siberia, Yakutia, Southern Siberia, Baikal region and North-East of Russia) a reduction in the bearing capacity of the standard reinforced concrete pile (35×35 cm section, 10 m long) was determined. The study revealed that for now in most regions the reduction in the bearing capacity of the pile is on average level (10–20 %). However a high (>30 %) decrease is expected by 2050. The temperature distribution in the soil mass was modelled in the Frost 3D program for the conditions of Norilsk, considering the thermal influence of the building. Numerical modelling was performed for a period of time until the middle of the XXI century. In the base of a building the resulting significant settlement of the thawing soil under its own weight can lead to the occurrence of negative friction forces. This effect must be taken into account when calculating pile foundations.

© PNRPU

Введение

Международными исследованиями [1, 2] зафиксирован факт продолжающегося повышения средней температуры на планете, так называемое «глобальное потепление». Называются различные причины данного явления, однако сам факт повышения температуры остается неоспоримым. Наряду с поисками решений по торможению этого процесса необходимо приспособливаться к изменяющимся условиям жизни и хозяйственной деятельности. Приходится сталкиваться с тем, что «жизненный цикл» ранее построенных зданий и сооружений не учитывал долгосрочных климатических изменений, исследования по которым ведутся относительно недавно (начало 90-х гг. XX в.).

Изменение климата России в целом характеризуется как продолжающееся потепление, тенденция к замедлению потепления по данным наблюдений не прослеживается [3]. Одной из основных природных систем, подверженных изменению климата на территории России, является зона распространения вечной мерзлоты. Вместе с повышением среднегодовых температур приповерхностного воздуха, варьирования снегового режима меняется также температура многолетнемерзлых пород, увеличивается зона сезонного оттаивания, запускается процесс деградации мерзлоты, сопровождающийся изменением границ ее распространения. С точки зрения геотехники данные изменения имеют большое значение, так как оказывают влияние на прочностные свойства грунтов и активизацию опасных криогенных процессов.

Геотехническое строительство на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) имеет ряд особенностей и предъявляет повышенные требования к проектированию и дальнейшей эксплуатации зданий, которые не всегда выполняются, поэтому в регионе нередки аварийные ситуации и

выход зданий из эксплуатационной пригодности. В последние десятилетия всё большее негативное влияние на состояние существующей застройки оказывает потепление климата. По оценке Я.А. Кроника [4] около четверти всех деформаций зданий и сооружений в криолитозоне России может быть связано с тем, что изменение климата превысило заложенные при строительстве нормативные пределы, по которым рассчитывался запас устойчивости. Внимание к проблеме привлекла недавняя крупномасштабная техногенная авария на ТЭЦ №3 Норильско-Таймырской энергетической компании. Одной из предварительных версий причины произошедшей разгерметизации резервуара (36 лет эксплуатации), стоящего на свайном фундаменте, была просадка грунта, вызванная потеплением в условиях вечной мерзлоты. Число выявленных деформированных объектов в Норильском районе за последние 10 лет значительно превысило их количество за предыдущие 50 лет [5]. Имеется общая для криолитозоны тенденция к нарастанию деформированности объектов [6].

Ввиду возросшей деформируемости и опасности возникновения аварийных ситуаций данное исследование призвано оценить климатические изменения с точки зрения влияния на несущую способность оснований эксплуатирующихся зданий и сооружений на вечной мерзлоте.

Метод определения влияния изменений климата на несущую способность свай

Более 75 % всех зданий и сооружений в криолитозоне России построено и эксплуатируется по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований: фундаменты вмерзены в грунты, и за счет этого обеспечивается требуемая несущая способность [3]. Большинство городских зданий представляют собой типовые панельные или кирпичные пяти-, девятиэтажные строения на свайных фундаментах [7].

Исходя из вышесказанного, несущая способность основания оценивалась для стандартной железобетонной сваи сечением 35×35 см и длиной 10 м (ГОСТ 19804.1-79, 1979). Этот типоразмер свай широко применялся в 1970–2000-е гг. при строительстве в районах вечной мерзлоты [6].

Несущая способность свай по грунту определялась по методу расчета оснований и фундаментов при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I (сохранения их мерзлого состояния), приведенном в СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Согласно этому методу, несущая способность основания вертикально нагруженной сваи F_u определяется по формуле

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i}), \quad (1)$$

где γ_t – температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха; γ_c – коэффициент условий работы основания; R – расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом сваи, кПа; A – площадь опирания сваи на грунт, m^2 ; $R_{af,i}$ – расчетное сопротивление мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи в пределах i -го слоя грунта, кПа; $A_{af,i}$ – площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, а для столбчатого фундамента – площадь поверхности смерзания грунта с нижней ступенью фундамента, m^2 ; n – число выделенных при расчете слоев многолетнемерзлого грунта.

R и $R_{af,i}$ (формула (1)) определялись по таблицам приложения В СП 25.13330.2012 исходя из полученных по формуле (2) значений T_z – температуры ММГ на глубине z и T_e – эквивалентной температуры ММГ (приняты однородные по составу ММГ).

$$T_{z,e} = (T'_0 - T_{bf})\alpha_{z,e} + (T_0 - T'_0)k_1 + T_{bf}, \quad (2)$$

где T'_0 – расчетная среднегодовая температура на верхней поверхности ММГ в основании сооружения, °С; T_{bf} – температура начала замерзания грунта, °С; $\alpha_{z,e}$ (α_z и α_e) – коэффициенты сезонного изменения температуры грунтов; k_1 – коэффициент теплового влияния сооружения; T_0 – среднегодовая T вечномерзлого грунта вне контура здания.

Потепление климата влияет на изменение двух расчетных параметров: $d_{th,n}$ – нормативной глубины сезонного оттаивания (равна толщине сезонно-талого слоя (СТС)) и T_0 (см. формулу (2)). От значения $d_{th,n}$ зависят $A_{af,i}$ (формула (1)), k_1 и $\alpha_{z,e}$ (формула (2)).

На основании собранных из литературных источников архивных и прогнозных данных по скорости увеличения мощности СТС и трендам увеличения температуры многолетнемерзлых грунтов для семи географических регионов России было определено повышение T_0 (табл. 1) и увеличение мощности СТС (табл. 2) на 2020 г. и к 2050 г., когда подойдет к концу период эксплуатации большинства рассматриваемых зданий.

Таблица 1

Изменение среднегодовой температуры вечномерзлого грунта T_0

Table 1

Change in mean annual temperature of permafrost soil T_0

Регион	Тренд T_0 , °С/г., 1965–2010 гг. [8]	Повышение T_0 за 1965–2020 гг., °С	Тренд T_0 по прогнозу климата в XXI в., °С/г.	Повышение T_0 к 2050 г., °С
Север Европейской части	0,024	1,32	0,03 [9]	2,22
Север Западной Сибири	0,031	1,71	0,04 [9]	2,91
Средняя Сибирь	0,025	1,38	0,036 [10,11]	2,46
Якутия	0,033	1,82	0,01 [12]	2,12
Юг Сибири	0,022	1,21	–	1,87
Прибайкалье, Забайкалье	0,034	1,87	–	2,89
Северо-восток России	0,024	1,32	–	2,04

Таблица 2

Определение изменения $d_{th,n}$ в ходе потепления климата

Table 2

Determination of the $d_{th,n}$ change during climate warming

Регион	Скорость увеличения мощности СТС, см/г. [13]	Увеличение мощности СТС к 2020 г., м	Скорость увеличения мощности СТС по прогнозу в XXI в., см/г. [14]	Увеличение мощности СТС к 2050 г., м
Север Европейской части	4	0,8	3	1,70
Север Западной Сибири	1	0,2	2	0,80
Средняя Сибирь	2	0,4	1	0,70
Якутия	1	0,2	1	0,50
Юг Сибири	Нет данных	Нет данных	3	0,90
Прибайкалье, Забайкалье	1,5	0,3	1	0,60
Северо-восток России	1	0,2	1	0,50

Результаты определения снижения несущей способности

Для каждого из семи географических регионов России была определена несущая способность свай по формуле (1) на момент строительства и с учетом климатических изменений к 2020 и 2050 гг. Произведено сравнение полученных значений. Снижение несущей способности свай относительно начала эксплуатации здания, сопоставленное с полученными значениями повышения T_0 (см. табл. (1)) и увеличения мощности СТС, приведено в табл. 3, 4. На рис. 1, 2 графически показано снижение несущей способности по регионам.

Таблица 3

Снижение несущей способности свай к 2020 г.

Table 3

Reduction in piles bearing capacity by 2020

Регион	Увеличение мощности СТС к 2020 г., м	Повышение температуры ММГ за 1965–2020 гг., °С	Снижение несущей способности свай за 1965–2020 гг., %
Север Европейской части	0,8	1,32	25
Север Западной Сибири	0,2	1,71	14
Средняя Сибирь	0,4	1,38	6
Якутия	0,2	1,82	18
Юг Сибири	Нет данных	1,21	13
Прибайкалье, Забайкалье	0,3	1,87	20
Северо-восток России	0,2	1,32	18

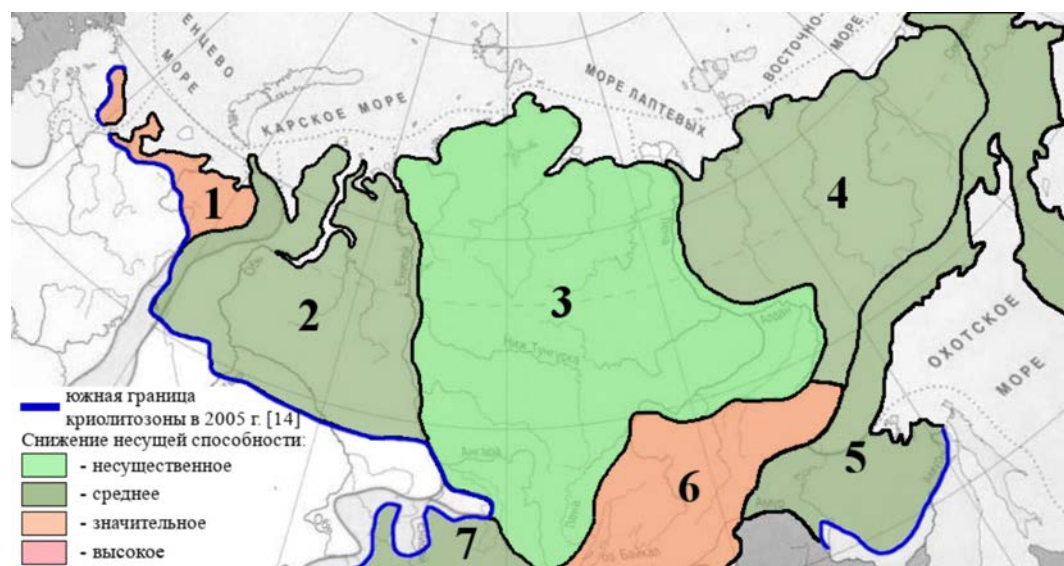


Рис. 1. Снижение несущей способности свай к 2020 г. для семи географических регионов России:
 1 – север Европейской части, 2 – север Западной Сибири, 3 – Средняя Сибирь, 4 – Якутия,
 5 – северо-восток России, 6 – Прибайкалье, Забайкалье, 7 – юг Сибири

Fig. 1. Reduction in piles bearing capacity by 2020 for the seven geographical regions of Russia:
 1 – North of the European part, 2 – North of Western Siberia, 3 – Middle Siberia, 4 – Yakutia,
 5 – North-East of Russia, 6 – Baikal region, 7 – Southern Siberia

Таблица 4

Снижение несущей способности свай в прогнозе на 2050 г.

Table 4

Reduction in piles bearing capacity in the forecast for 2050

Регион	Увеличение мощности СТС к 2050 г., м	Повышение температуры ММГ к 2050 г., °С	Прогнозируемое снижение несущей способности свай к 2050 г., %
Север Европейской части	1,70	2,22	44
Север Западной Сибири	0,80	2,91	67
Средняя Сибирь	0,70	2,46	45
Якутия	0,50	2,12	31
Юг Сибири	0,90	1,87	26
Прибайкалье, Забайкалье	0,60	2,89	66
Северо-восток России	0,50	2,04	28

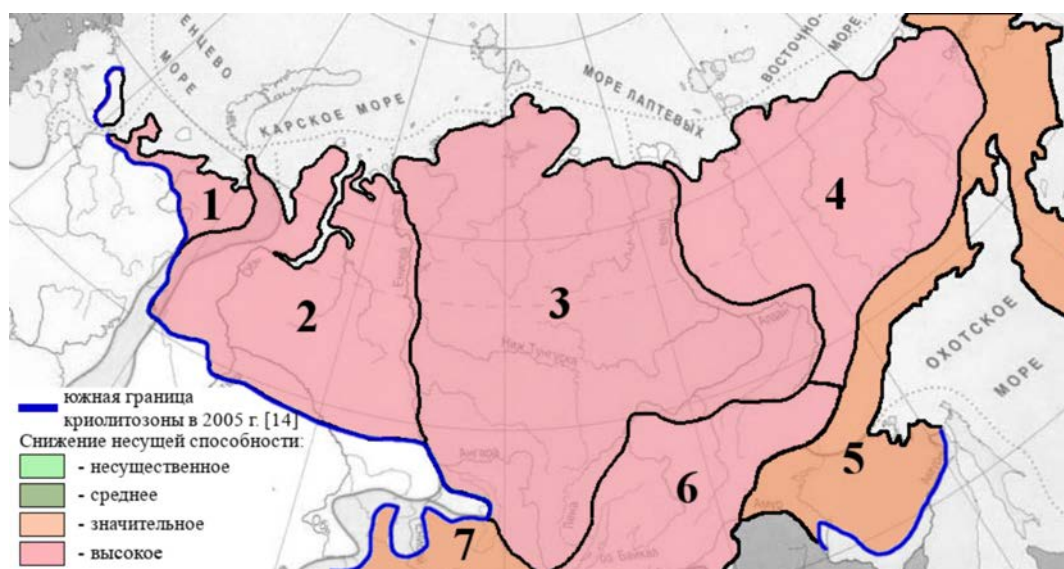


Рис. 2. Снижение несущей способности свай к 2050 г. для 7 географических регионов России: 1 – север Европейской части, 2 – север Западной Сибири, 3 – Средняя Сибирь, 4 – Якутия, 5 – северо-восток России, 6 – Прибайкалье, Забайкалье, 7 – юг Сибири

Fig. 2. Reduction in bearing capacity of piles by 2050 for the seven geographical regions of Russia: 1 – North of the European part, 2 – North of Western Siberia, 3 – Middle Siberia, 4 – Yakutia, 5 – North-East of Russia, 6 – Baikal region, 7 – Southern Siberia

К 2020 г. снижение несущей способности свайного основания достигло 25 % (север Европейской части), но для большинства регионов остается на среднем уровне (10–20 %).

Полученное снижение несущей способности для севера Западной Сибири (14 %) (см. табл. 3) хорошо сходится со средним по региону значением в 17 %, приведенным в работе Д.А. Стрелецкого и др. [6], где исследовалось изменение несущей способности оснований сооружений на основе рассчитанных по существующим климатическим базам данных и прогнозным сценариям значений среднегодовой температуры верхней кровли мерзлоты и глубины СТС.

Прогноз до 2050 г. показал высокое (> 30 %) ее снижение с наибольшими значениями для севера Западной Сибири.

Необходимо отметить, что климат является только одним из факторов, оказывающих влияние на состояние зданий и сооружений на вечной мерзлоте. Большое значение имеют

такие факторы, как техногенное и прямое антропогенное воздействие [16], которые могут также негативно сказываться на снижении несущей способности основания, особенно в длительной перспективе.

Численные исследования температурного распределения в массиве грунта

Для оценки влияния потепления климата на температурный режим грунтов основания здания и его осадку было осуществлено численное моделирование в программе Frost 3D температурного распределения в массиве грунта, вмещающего свайные фундаменты здания, построенного по первому принципу строительства на ММГ в условиях Норильска [17, 18], на временной период с 1981 по 2059 г. Температура воздуха до 2020 г. задавалась по данным метеорологических наблюдений, значения после – по прогнозным данным региональной климатической модели Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [19].

По результату моделирования к 2059 г. произойдет увеличение СТС под серединой здания на 2 м. Получена значительная разница между вызванными потеплением климата скоростями увеличения СТС вне контура здания (0,8 см/г.) и под серединой здания (3 см/г.). Значение вне контура здания согласуется со скоростью увеличения толщины СТС для Средней Сибири в целом (1 см/г.), вычисленной по данным Павловой и др. [14] изменения характеристик криолитозоны в XXI в. Также моделирование показало повышение среднегодовой температуры на поверхности ММГ под серединой здания с $-2,7$ до $-0,1$ °С.

При помощи «Калькулятора осадки» программы Frost 3D с учетом потеплением климата за период 60 лет (до 2059 г.) и теплового влияния здания была рассчитана составляющая осадки основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта. Полученные изополя осадок массива грунта приведены на рис. 3. Наибольшая осадка грунтов основания здания под действием собственного веса грунта составила 76,8 см, относительная разность осадок в продольном направлении – 0,016, в поперечном – 0,019. Деформации приведут к аварийному состоянию здания.

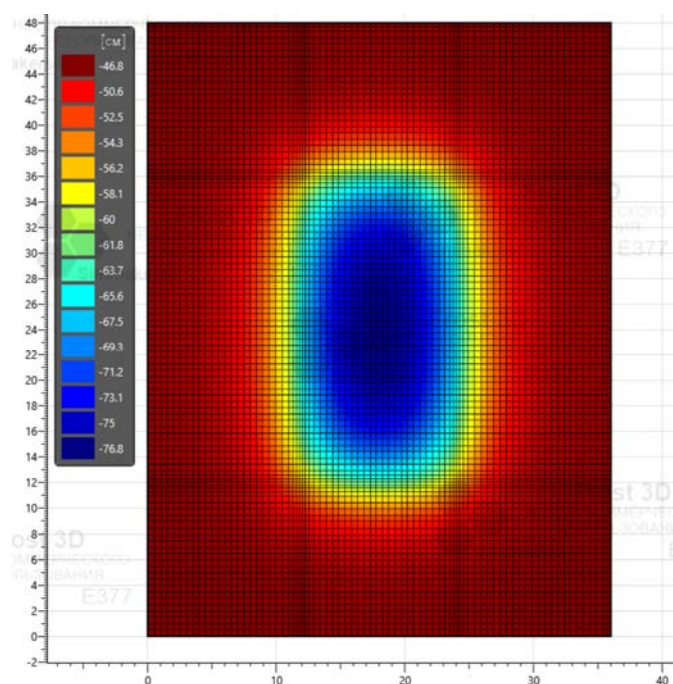


Рис. 3. Осадка массива грунта в 2059 г. Вид сверху
Fig. 3. Settlement of the soil mass in 2059. Top view

Найденные значения осадки под действием собственного веса грунта при оттаивании могут быть полезны для определения отрицательного трения при расчете свайных фундаментов.

Выводы

1. Потепление климата на территории России заметно сказывается на состоянии криолитозоны. Происходит процесс деградации вечной мерзлоты. Вместе с повышением среднегодовой температуры грунтов и увеличением глубины сезонного оттаивания уменьшается несущая способность свайных оснований зданий и сооружений.

2. Проведенное исследование показало, что на текущий момент для зданий 60–80-х гг. постройки (I принцип строительства на ММГ) снижение несущей способности свайного основания достигает 25 %, но для большинства регионов остается на среднем уровне (10–20 %).

3. Расчет изменения несущей способности к 2050 г. на основании существующих прогнозов изменения климата показал высокое ее снижение. Большинство зданий старой постройки окажутся непригодными к эксплуатации ещё до окончания их «жизненного цикла». Необходима организация мониторинга состояния таких зданий, планирование мер по обеспечению их эксплуатационной надежности. К числу технологических и конструктивных решений относятся системы термостабилизации грунтов, в том числе совместно с додавливанием свай в оттаявший грунт до плотного упора [20], позволяющие обеспечивать работоспособность оснований и фундаментов зданий и сооружений в условиях изменения климата.

4. Численное моделирование в программе Frost 3D температурного распределения в массиве грунта с учетом теплового влияния здания для условий Норильска на период до середины XXI в. показало значительную осадку грунтов основания, обусловленную действием собственного веса оттаивающего грунта, которая может привести к возникновению сил отрицательного трения, что необходимо учитывать при расчете свайных фундаментов.

Библиографический список

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). – IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. – 151 p.

2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. – Geneva: IPCC Secretariat, 2019.

3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Росгидромет. – М., 2014. – 1007 с.

4. Кроник Я.А. Аварийность и безопасность природно-техногенных систем в криолитозоне // Мат-лы Второй конф. геокриологов России. – Т. 4: Инженерная геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – С. 138–147.

5. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions // *Geography, Environment, Sustainability Journal*. – 2012. – Vol. 5, № 3. – P. 104–119. DOI: 10.24057/2071-9388-2012-5-3-104-119

6. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера земли. – 2012. – № 1. – С. 22–32.
7. Shur Y. and Goering D. Climate change and foundations of buildings in permafrost regions // Permafrost Soils. Soil Biology; R. Margesin (eds). – Berlin: Springer. – 2008. – Vol. 16. – P. 251–260. DOI: 10.1007/978-3-540-69371-0_17
8. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. – Новосибирск: Гео, 2008. – 229 с.
9. Пармузин С.Ю., Чепурнов А.Б. Прогноз динамики многолетнемерзлых пород европейского севера России и Западной Сибири в XXI веке // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. – 2001. – № 4. – С. 64–68.
10. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет / В.В. Клименко, Л.Н. Хрусталева, О.В. Микушина, Л.В. Емельянова, Э.Д. Ершов, С.Ю. Пармузин, А.Г. Терешин // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 3. – С. 3–13.
11. Хрусталева Л.Н., Давыдова И.В. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 2. – С. 68–75.
12. Перльштейн Г.З., Павлов А.В., Буйских А.А. Изменения криолитозоны в условиях современного потепления климата // Геоэкология (инж. геология, гидрогеология, геокриология). – 2006. – № 4. – С. 305–312.
13. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / Росгидромет. – М., 2012. – 512 с.
14. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения / Т.В. Павлова, В.М. Катцов, Е.Д. Надежина, П.В. Спорышев, В.А. Говоркова // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 2. – С. 3–13.
15. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на севере России // Криосфера земли. – 2009. – № 4. – С. 32–39.
16. Перспективы развития поселений Севера в современных условиях. / В.А. Ильичев, В.В. Владимиров, А.В. Садовский [и др.]. – М.: РААСН, 2003. – 152 с.
17. Zepalov F.N. et al. Active-layer Monitoring at a New CALM Site, Taimyr Peninsula, Russia // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost. – 2008. – Vol. 2. – P. 2037–2042.
18. Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск – Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX, № 2. – С. 69–77.
19. Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий / В.М. Катцов И.М. Школьник, В.Н. Павлова [и др.]. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2019. – Вып. 593. – С. 6–52.
20. Власов В.П., Гулый С.А. Способ усиления свайных фундаментов в зоне вечной мерзлоты // Знание – на службу нуждам Севера: материалы 1-й Междунар. конф. Академии Северного форума Республики Саха (РФ). – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1996. – С. 184.

References

1. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.
2. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: press release. Geneva: IPCC Secretariat, 2019.
3. Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniiakh klimata i ikh posledstviakh na territorii Rossiiskoi Federatsii [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in Russian Federation]. Moscow, Roshydromet, 2014, 1007 p.
4. Kronik Y.A. Avariinost' i bezopasnost' prirodno-tekhnogennykh sistem v kriolitozone [Accident and safety of natural-technological systems in permafrost zone]. *Materialy Vtoroi konferentsii geokriologov Rossii. Vol. 4 Inzhenernaia geokriologiya*. Moscow, MSU, 2001, pp. 138–147.
5. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions. *Geography, Environment, Sustainability Journal*. 2012, vol. 5, no. 3, pp. 104–119. DOI: 10.24057/2071-9388-2012-5-3-104-119.
6. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Grebenets V.I. Izmenenie nesushchei sposobnosti merzlykh gruntov v svyazi s potepleniem klimata na severe Zapadnoi Sibiri [Changes of foundation bearing capacity due to climate warming in Northwest Siberia]. *Kriosfera zemli*, 2012, no. 1. pp. 22–32.
7. Shur Y., Goering D. Climate change and foundations of buildings in permafrost regions. In: Margesin R. (eds) *Permafrost Soils. Soil Biology*. Berlin, Springer, 2008. vol. 16, pp. 251–260. DOI: 10.1007/978-3-540-69371-0_17.
8. Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Permafrost Zone Monitoring]. Novosibirsk, Geo, 2008, 229 p.
9. Parmuzin S.Y., Chepurnov A.B. Prognoz dinamiki mnogoletnemerzlykh porod evropeiskogo severa Rossii i Zapadnoi Sibiri v XXI veke [Forecast of the dynamics of permafrost in the European north of Russia and Western Siberia in the XXI century]. *Moscow Univ. Geol. Bull.*, 2001, no. 4, pp. 64–68.
10. Klimenko V.V., Khrustalyov L.N., Mikushina O.V., Emel'yanova L.V., Ershov E.D., Parmuzin S.Yu., Tereshin A.G. Izmeneniia klimata i dinamika tolshch mnogoletnemerzlykh porod na severo-zapade Rossii v blizhaishie 300 let [Climate change and dynamics of the permafrost in northwestern Russia within the next 300 years]. *Kriosfera zemli*, 2007, vol. XI, no. 3, pp. 3–13.
11. Khrustalyov L.N., Davydova I.V. Prognoz potepleniia klimata i ego uchet pri otsenke nadezhnosti osnovanii zdaniy na vechnomerzlykh gruntakh [Forecast of climate warming and account of it at estimation of foundation reliability for buildings in permafrost zone]. *Kriosfera zemli*, 2007, vol. XI, no. 2, pp. 68–75.
12. Perlstein G.Z., Pavlov A.V., Buiskey A.A. Izmeneniia kriolitozony v usloviakh sovremennogo potepleniia klimata [Changes in the permafrost zone upon the modern climate warming]. *Geoecology*, 2006, no. 4, pp. 305–312.
13. Metody otsenki posledstviy izmeneniia klimata dlia fizicheskikh i biologicheskikh sistem [Methods for Assessing the Effects of Climate Change on Physical and Biological Systems]. Moscow, Roshydromet, 2012. 512 p.
14. Pavlova T.V., Kattsov V.M., Nadyozhina Ye.D., Sporyshev P.V., Govorkova V.A. Raschet evoliutsii kriosfery v XX i XXI vekakh s ispol'zovaniem global'nykh klimaticheskikh mod-

elei novogo pokoleniia [Terrestrial cryosphere evolution through the XX and XXI centuries as simulated with the new generation of global climate models]. *Kriosfera zemli*, 2007, vol. XI, no. 2, pp. 3–13.

15. Pavlov A.V., Malkova G.V. Melkomasshtabnoe kartografirovaniie trendov sovremennykh izmenenii temperatury gruntov na severe Rossii [Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian north]. *Kriosfera zemli*, 2009, no. 4, pp. 32–39.

16. Ilyichev V.A. et al. Perspektivy razvitiia poselenii Severa v sovremennykh usloviiah [Prospects for the development of settlements in the North in modern conditions]. Moscow: RAABS, 2003. 151 p.

17. Zepalov F.N. et al. Active-layer Monitoring at a New CALM Site, Taimyr Peninsula, Russia. *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost*, 2008, Vol. 2, pp. 2037–2042.

18. Grebenets V.I., Isakov V.A. Deformatsii avtomobil'nykh i zheleznykh dorog na uchastke Noril'sk – Talnakh i metody bor'by s nimi [Deformations of roads and railways within the Norilsk-Talnakh transportation corridor and the stabilization methods]. *Kriosfera zemli*. 2016, vol. XX, no. 2, pp. 69–77.

19. Kattsov V.M. et al. Razvitie tekhnologii veroiatnostnogo prognozirovaniia regional'nogo klimata na territorii Rossii i postroenie na ee osnove stsenarnykh prognozov izmeneniia klimaticheskikh vozdeistvii na sektory ekonomiki. Chast' 2: Otsenki klimaticheskikh vozdeistvii [Development of a technique for regional climate probabilistic projections over the territory of Russia aimed at building scenarios of climate impacts on economy sectors. Part 2: Climate impact projections]. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A.I. Voeikova*, 2019, iss. 593, pp. 6–52.

20. Vlasov V.P., Gully S.A. Sposob usileniia svainykh fundamentov v zone vechnoi merzloty [Method of foundations strengthening in permafrost zone]. *Znanie – na sluzhbu nuzhdam Severa: mat-ly 1-oi Mezhdunar. konf. Akademii Severnogo Foruma respubliky Sakha*. Yakutsk, 1996, p. 184.