

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2020, №3, Том 7 / 2020, N 3, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-3-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS320.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS320 (<http://dx.doi.org/10.15862/02SATS320>)

Проблема просадок мостовых опор в условиях деградации многолетнемерзлого основания и возможность ее решения

Томилов С.Н., Сим А.Д., Гринёв П.Е.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Томилов Сергей Николаевич, e-mail: serg_tomilov@mail.ru

Аннотация. Многолетнемерзлые грунты распространены на значительных территориях нашей страны и при возведении инженерных сооружений в таких условиях необходимо учитывать фактор опирания фундаментов на мерзлый грунт, который изначально может обладать высокими физико-механическими характеристиками. Но не менее распространено явление деградации многолетней мерзлоты с ее оттаиванием как по природной причине вследствие глобального потепления, так и по техногенной причине, когда вмешательство при строительстве и далее само сооружение инициируют растепление грунтов основания. В большинстве своем многолетнемерзлые грунты при оттаивании теряют прочностные и упругие свойства, переходя в практически жидкую консистенцию, что влечет отказ опор в несущей способности и стабильности положения.

При развитии дорожной сети и строительстве мостов в северных регионах в конце 60-х – начале 70-х годов XX века повсеместно применялся I принцип проектирования, предполагавший использование и сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии, что не требовало глубокого заложения фундаментов. Однако через 20–30 лет эксплуатации стали отмечаться случаи неожиданных и значительных просадок опор мостов, что как выяснилось, было следствием оттаивания мерзлых грунтов на всю глубину заложения фундаментов. Также отмечено, что в отдельных случаях

просадкам опор мостов предшествуют явления их морозного пучения, которые проявляются незадолго до их погружения и почти полного отказа.

В статье на конкретном примере рассматривается случай неожиданного отказа опор автодорожного моста, когда после 30 лет нормальной эксплуатации всего за три года опоры получили столь значительные просадки, что создалась угроза не только безопасности движения, но целостности всего сооружения. А перед этим у некоторых опор отмечалось их морозное пучение.

Целью настоящего исследования является анализ механизма морозного пучения и последующей просадки фундаментов опор мостов вследствие прогрессирующей деградации многолетней мерзлоты и предложение путей восстановления и сохранения работоспособности опор.

В результате работы проанализированы причины и характер деградации многолетнемерзлого грунтового основания, расчетным путем на конкретном примере подтверждены наблюдения за значительными просадками и потерей несущей способности мостовых опор, а также обоснована эффективность предложенных конструктивных мер усиления.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота; природный фактор; техногенный фактор; грунт основания; опора моста; свая; морозное пучение; просадка

The bridge piers sagging problem under permafrost subbase degradation conditions and the possible solution

Sergey N. Tomilov, Alexander D. Sim, Pavel E. Grinev

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Sergey N. Tomilov, e-mail: serg_tomilov@mail.ru

Abstract. Permafrost soils are common for extensive areas of our country and when building engineering structures in such conditions, it is necessary to take into account the factor supporting subbase on the permafrost soil, which may initially have high stress-related characteristics. But the permafrost degradation phenomenon with frost retreat no less common. It can be happening both for natural reasons due to global warming, and for man-made reasons, when interference during construction and further the structure itself initiates subsoil frost retreat. For the most part, permafrost soils lose their strength and elastic properties during the frost retreat, turning into an almost liquid consistency, which entails the failure of the supports in the bearing capability and position stability.

With the road network development and the bridge's construction in the northern regions at the end of the 60s – early 70s of the XX century, the first principle of the design was widely applied. It was for use and maintenance of the subsoil in a frozen state, which means not require a deep foundation required. However, after 20–30 years of operation, cases of unexpected and significant bridge piers sagging began to be noted, as it turned out, was the result of permafrost soils frost retreat to the entire depth of the foundation.

It was also noted that in some cases the bridge piers sagging is preceded by its frost boil phenomena, which appear shortly before piers sinking and almost complete failure.

In this article case of an unexpected bridge piers failure examined on a specific bridge. After 30 years of proper functioning, pierces received such significant sagging, so in just three years that got to the point when it's not only traffic safety but the cohesiveness of the entire structure. And before that, a frost boil was noted at some of the bridge pierce.

The purpose of this study is to analyze the frost boil mechanism and sagging of the bridge pierce' foundations due to the progressive permafrost degradation and to suggest restoring and maintaining ways for pierces' operation capacity.

Overall, the reasons and principles of permafrost subbase degradation were analyzed in this paper. through calculations using a specific example, significant sagging and bridge pierce bearing capability loss observations were justified and substantiated the effectiveness of the proposed in this article structural reinforcement measures.

Keywords: permafrost; natural factor; technogenic factor; subbase; bridge piers; stilt; frost boil; sagging

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Многолетнемерзлые грунты, используемые в качестве основания при строительстве зданий и сооружений, распространены на значительной части территории нашей страны. Деятельный слой почв и грунта, сезонно оттаивающий и замерзающий может иметь различную толщину в зависимости от местных условий, но, как правило, невелик и фундаменты строительных систем должны опираться на мерзлоту. Известны два принципа проектирования фундаментов в зависимости от конструктивных и технологических особенностей зданий и сооружений, инженерно-геокриологических условий¹:

принцип I – многолетнемерзлые грунты основания используются в мерзлом состоянии, сохраняемом в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружения;

принцип II – многолетнемерзлые грунты основания используются в оттаянном или оттаивающем состоянии (с их предварительным оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения сооружения или с допущением их оттаивания в период эксплуатации сооружения).

Все грунты в мерзлом состоянии обладают достаточно высокими физико-механическими показателями для использования их в качестве оснований для фундаментов, отсюда и предпочтение проектирования по первому принципу.

Чукотский автономный округ – одна из территорий России с повсеместным распространением многолетней мерзлоты и как нигде там актуальна проблема строительства на таких грунтовых основаниях. В регионе со слаборазвитой дорожной инфраструктурой, с обеспечением внутренних сообщений только по автозимникам, которые кроме сезонности действия еще требовали и значительных затрат на их содержание, требуется устойчивая транспортная сеть, основанная на постоянных, круглогодично действующих автомобильных дорогах. Строительство новых дорог, а также перевод зимников в круглогодичную эксплуатацию с возведением на них мостов капитального типа как стратегическое направление развития региона можно отслеживать с конца 60-х – начала 70-х годов XX века по настоящее время.

В настоящей статье освещается один из аспектов взаимодействия мостовых сооружений с многолетнемерзлыми основаниями в связи с

¹ Свод правил. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 / ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: Минрегион РФ, 2012.

деградационными процессами в последних, имеющих как природное, так и техногенное происхождение.

Постановка задачи

Research objective

Большинство капитальных мостов, построенных на дорогах Чукотского автономного округа в начальный период развития дорожной сети, а именно с конца 60-х примерно по конец 80-х годов XX века имели опоры со свайными фундаментами, выполненными по буро-вставной технологии – в пробуренные скважины в мерзлом грунте опускались железобетонные сваи; при этом глубина заложения свай, имеющих сечение размером не более 0,3–0,35 м, составляла 6,0–7,5 м. Такая особенность конструкций фундаментной части опор обусловлена в первую очередь отсутствием техники для возведения более значительных фундаментов, да и мерзлые грунты основания вполне обеспечивали несущую способность опор, повышение которой при необходимости можно было достичь увеличением числа свай в фундаменте.

С течением времени с частью опор мостов, покоящихся на описанных выше фундаментах, стали происходить неблагоприятные эволюции – морозное пучение свай, и в противоположном направлении – просадки. При этом в организациях, осуществляющих содержание объектов транспорта, отмечают, что данные негативные деформации могли проявиться через 25, а то и 30 лет благополучной эксплуатации сооружений. Замечено, что вначале происходит пучение с выталкиванием свай вверх, а затем просадка вниз с прохождением исходного высотного положения и далее. Эти явления отмечены на многих обследованных авторами мостах Чукотки и не только. Авторам известны такие проблемные сооружения также на дорогах Якутии, Магаданской области. В качестве характерных примеров буквально текущего времени можно назвать мост через р. Барса на автомобильной дороге «Яна» в республике Саха (Якутия), мост через реку Млелювеем на автомобильной дороге Певек – Комсомольский в Чукотском автономном округе, величины деформации выпучивания, а затем просадки опор которых достигают десятков сантиметров, что приводит в ненормативное состояние продольного и поперечных профилей ездового полотна, влекут разрушение деформационных швов, повреждения конструкций пролетных строений и в конечном итоге создают угрозу обрушения последних.

Установлено, что отмеченные деформации опор связаны с деградационными процессами, происходящими в мерзлых грунтах основания, а именно – их оттаивание и понижение кровли многолетней мерзлоты. Механизм явления, не вдаваясь в подробности можно описать

следующим образом: с понижением кровли мерзлоты уменьшается часть сваи, опирающаяся по боковой поверхности на мерзлый грунт и сил бокового трения становится недостаточно для противодействия морозному пучению, в то время как нижняя часть сваи, опираясь на мерзлое основание еще воспринимает нагрузку от сооружения, передаваемую сверху вниз; далее, мерзлота уходит ниже и свая целиком оказывается в талом грунте, что вызывает ее просадку. Отметим, что степень потери прочностных и деформативных свойств грунтов при оттаивании зависит от их генезиса, структурных связей и физико-механических свойств.

Среди природных причин деградации многолетней мерзлоты можно назвать потепление климата на планете, но даже при факте самого потепления его влияние на динамику мерзлотных явлений совсем неоднозначно [1; 2], хотя многие исследователи сходятся во мнении уже случившегося и развивающегося процесса потепления с его влиянием на территории с многолетней мерзлотой. Так, в одном из исследований последних лет в результате мониторинга северо-восточных регионов Чукотки и последующем моделировании климатических сценариев представлен прогноз на XXI век – к концу столетия толщина активного (сезонно замерзающего и оттаивающего) слоя увеличится на 6–13 % при позитивном сценарии и на 43–87 % при отрицательном сценарии климатического моделирования [3; 4]. Исследователи отмечают сложности моделирования динамики процессов в многолетней мерзлоте в связи с многообразием и изменчивостью данных и сходятся во мнении о необходимости продолжения и углубления изучения вопроса [5; 6].

Более понятен техногенный фактор воздействия – нарушение термодинамического баланса мерзлых грунтов посредством вмешательства в их шаткое равновесное состояние при выполнении строительных работ и затем при эксплуатации – передача тепла самими конструкциями и их фундаментами [7]. Повреждения многих дорожных сооружений связаны с тепловой конвекцией между сооружением и мерзлым основанием [8; 9]. Материалы опор в капитальном исполнении, сталь и железобетон, обладая значительной теплопроводностью наиболее полно иллюстрируют процесс техногенного воздействия.

Для конкретного описания проблемы и постановки задачи обратимся к мосту через реку Млелювеем, отмеченному выше, как пример объекта, на котором вопросы деградации мерзлого основания опор актуальны и решаются в настоящее время. Автодорожный мост через р. Млелювеем выполнен в балочно-разрезной системе по схеме 8,68 м x 9 в расчетных длинах пролетов и имеет полную длину 81,34 м. Пролетные строения – железобетонные плитные полной длины по 9,0 м в каждом пролете по типовому проекту вып. 3.503-29 ГПИ БелГипродор, 1973 г.

Мост запроектирован на нормативные временные нагрузки Н-30, НК-80 по СН 2002-62² и построен в 1987 г. Все опоры моста – свайные безростверковые с железобетонными сваями сечением 0,32х,032 м по 5 шт. в ряд на каждую опору (две из 10 опор имеют по два ряда свай). Глубина погружения ниже дневной поверхности (заложение) всех свай составляет 6,5 м.

На время проектирования моста и его строительства (1987) глубина сезонного промерзания-оттаивания на участках пойм мостового перехода составляла 1,3–1,5 м и далее ниже – многолетнемерзлые грунты.

Вначале были отмечены явления морозного пучения у двухрядных опор, что понятно, так как нагрузка на отдельную сваю у них вдвое меньше, следовательно, и меньше противодействие силам пучения. В 2014 году величина выпучивания опоры № 7 привела к перелому продольного профиля ездового полотна и эксплуатирующая организация должна была назначить мероприятия по решению возникшей проблемы. Могут быть эффективными химический способ с засолением грунта, инженерно-мелиоративный с дренажом и водоотводом [10], механический с заменой грунта, также применяют утепления естественными или искусственными материалами [11; 12]. Так как известные химический, инженерно-мелиоративный, механический способы в данной ситуации оказались неприемлемы, было принято решение устроить тепловую изоляцию поверхности грунта, прилегающего к сваям опоры, решая одновременно две противоположные задачи: общее снижение глубины промерзания; сглаживание градиента теплообмена при замораживании-оттаивании.

Однако собрать данные длительного наблюдения за эффективностью исполненного решения не удалось, потому что в 2016 году начались заметные просадки практически всех опор и к осени 2019 года по данным наблюдения маркшейдерской службы эксплуатирующей организации для некоторых из них достигли значительных величин, таблица 1.

Резкое проявление просадок (особенно опор № 4, 5, 6) после 30 лет эксплуатации может свидетельствовать о потере грунтами основания прочностных свойств в силу перехода из мерзлого в талое состояние.

² Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. СН 200-62 / Государственный комитет Совета министров СССР по делам строительства. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 328 с.

Таблица 1 / Table 1
Просадки опор моста по наблюдениям в период с 2016 по 2019 год
Bridge piers sagging according to observations 2016 to 2019 period

Место съемки Survey location	Осадки, мм, для опор («-» – осадка, «+» – подъем) Sags, mm, for pierce ("-" – sag, "+" – rise)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Левая сторона опоры Left piers side	-40	-5	-22	-286	-325	-283	-42	-20	+6	-3
Правая сторона опоры Right piers side	-	-22	-168	-282	-234	-211	-43	-67	+20	-2

Составлено авторами / Compiled by the authors

Цель настоящего исследования – проанализировать материалы проведенных инженерно-геологических изысканий, данные геодезических наблюдений, сформулировать причину просадок опор, оценить их текущее состояние и дать обоснованное предложение по усилению опор для обеспечения дальнейшей эксплуатации моста.

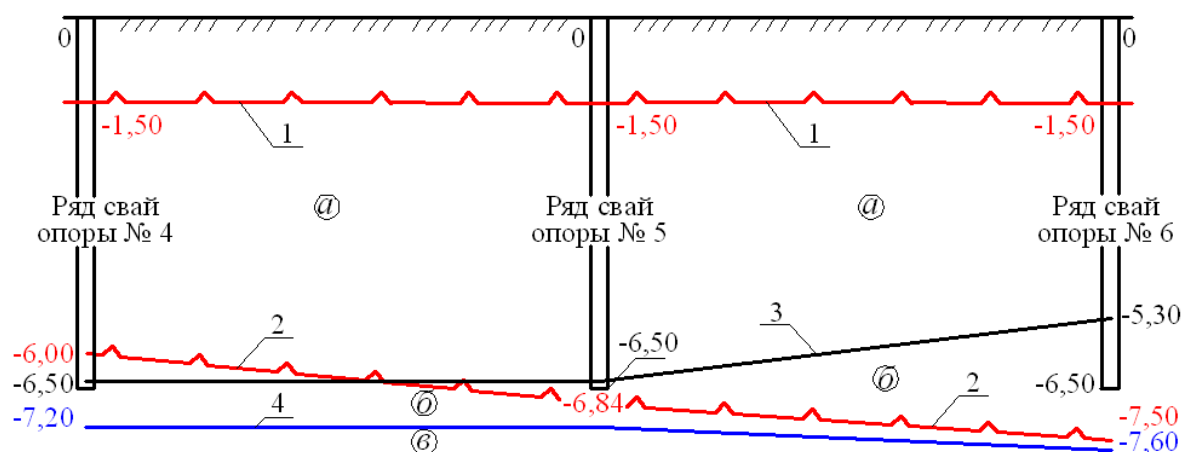
Анализ и решения

Analysis and solutions

Процесс деградация многолетнемерзлых грунтов в основаниях мостовых опор идет длительное время, как полагаем в большей степени по техногенным причинам, чем по природным и активность его также дополняется отсутствием торфяного и мохового покрытия на пойменных участках мостового перехода. Грунтовый массив, в который погружены железобетонные сваи, представлен среднелдыстыми галечниковыми грунтами с песчаным и супесчаным заполнителем, которые при оттаивании становятся малопрочными с проявлением тиксотропных свойств. Понижение кровли многолетней мерзлоты приводит к ее отрыву от деятельного сезонно замерзающего и оттаивающего слоя с образованием и нарастанием так называемого «перезимка» – массива грунта с постоянно положительной температурой, что ускоряет деградацию многолетней мерзлоты [13].

Материалы инженерно-геологических изысканий 2015 года представляют положение кровли многолетней мерзлоты в уровне концов свай опор и даже ниже его (рисунок 1). Разведочное бурение, выполненное в феврале 2020 года, показало отсутствие мерзлых грунтов на всю глубину проходки, составляющую 8,5–9,0 м.

Слабодыстые галечниковые с супесчаным заполнителем грунты («а» на рисунке 1) в талом состоянии не могут нести нагрузку опор и расположенный ниже слой глины пластичной («б» на рисунке 1) при оттаивании если и задержал интенсивность просадки, то несущественно.



1 – среднее положение кровли многолетней мерзлоты на время строительства моста;
2 – положение кровли многолетней мерзлоты по данным инженерно-геологических изысканий в 2015 г.; 3 – верхняя граница глины пластичной черной; 4 – верхняя граница углисто-глинистых сланцев, скального грунта

1 – average permafrost top position during the bridge construction; 2 – permafrost top position according to engineering-geological examination in 2015; 3 – black foul clay upper limit; 4 – carbonaceous-argillaceous slate upper limit, ledge rock

Рисунок 1. Схема геологического разреза
вдоль моста у опор № 4, 5, 6 (разработано авторами)

Figure 1. Axial section diagram lengthwise
the bridge at piers No. 4, 5, 6 (developed by the authors)

На отметках от -7,20 до -7,60 м находится кровля скального грунта в виде углисто-глинистых сланцев, обладающих значительной прочностью как в мерзлом, так и в талом состоянии. Именно этот грунт может быть надежным основанием для фундаментов опор, обеспечивающим дальнейшую эксплуатацию мостового сооружения.

Перед тем, как назначать конструктивные решения стабилизации положения опор, необходимо расчетным путем оценить их состояние в сравнении с данными инструментального наблюдения. С учетом талого состояния грунтов на всю глубину погружения свай и соответствующих их физико-механических характеристик был выполнен расчет несущей способности свай (таблица 2) и их просадок (таблица 3), при этом временная нагрузка принималась в соответствии с фактической на данном участке дороги. Расчет выполнен в программном комплексе «Опора X».

Полученные результаты расчетов (таблица 2, таблица 3) полностью соответствуют результатам практических наблюдений, что позволяет считать предшествующий анализ адекватным и дает основание разработать усиление опор с учетом их текущего состояния.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты расчета несущей способности
железобетонных свай по грунту в текущем состоянии опор**
**Calculation results of the reinforced bound pile bearing
capability on the subfoundation in the current state of the pierces**

№ опоры Pierce number	Тип Type	Расчет несущей способности ж.б. свай по грунту Bearing capability calculation of the reinforced bound pile bearing capability on the subfoundation			
		От постоянной нагрузки Constant load		От полной нагрузки: постоянная + временная Full load: constant load + temporary load	
		Проверка на вдавливание Jacking check	Проверка по боковой поверхности Lateral area check	Проверка на вдавливание Jacking check	Проверка по боковой поверхности Lateral area check
4	Двухрядная Double-chain	Запас 5,4 кН	Перегруз 16,8 кН/м ²	Перегруз 81,0 кН	Перегруз 16,8 кН/м ²
5	Однорядная Single-chain	Перегруз 113,1 кН	Перегруз 85,8 кН/м ²	Перегруз 294,4 кН	Перегруз 85,8 кН/м ²
6	Однорядная Single-chain	Перегруз 115,3 кН	Перегруз 27,0 кН/м ²	Перегруз 294,6 кН	Перегруз 82,4 кН/м ²

Составлено авторами / Compiled by the authors

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчета просадок опор в текущем состоянии
Pierces sagging calculation results in the current state

№ опоры Pierce number	Тип Type	Расчетные просадки опор, мм Pierces sagging calculation, mm		Просадки опор, замеренные съемкой в период 2016–2019 г., мм Pierces sagging, measured by survey in the 2016–2019 period, mm	
		От постоянной нагрузки Constant load	От полной нагрузки: постоянная + временная Full load: constant load + temporary load	Слева Left	Справа Right
4	Двухрядная Double-chain	201,2	255,8	286	282
5	Однорядная Single-chain	202,2	276,4	325	234
6	Однорядная Single-chain	231,0	316,1	283	211

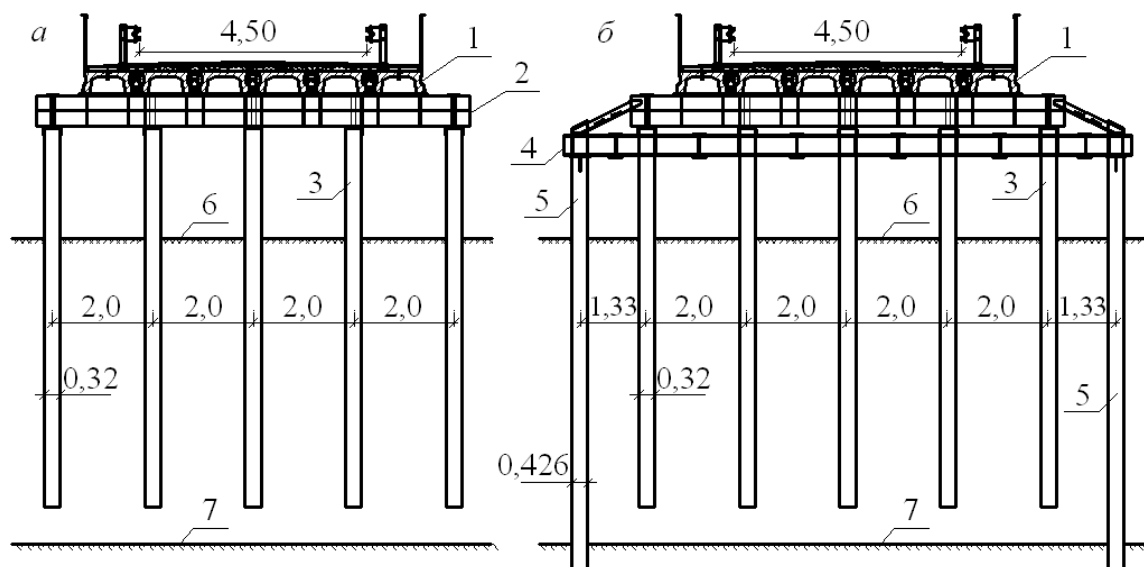
Составлено авторами / Compiled by the authors

Для обеспечения несущей способности и стабильности положения, особенно при прохождении слабых и неустойчивых грунтов, предпочтение отдают свайным фундаментам [14] и в отдельных случаях находит обоснование применение винтовых свай [15].

Учитывая территориальные особенности, наличие строительных материалов и возможности производства было принято решение усилить каждую опору двумя добавленными сваями – по одной с верховой и

низовой сторон, погруженными до скального грунта и забуренными в него не менее чем на требуемые нормами³ 0,5 м.

Расположение добавленных свай как элементов усиления запроектировано так близко к существующим сваям, как это позволяет технология их погружения без разборки пролетных строений и перерыва движения (рисунок 2).



а – до усиления; б – после усиления; 1 – плитное пролетное строение; 2 – основная насадка; 3 – основные железобетонные сваи; 4 – добавленная насадка; 5 – добавленные сваи; 6 – дневная поверхность; 7 – кровля скального грунта

а – before reinforcement; б – after reinforcement; 1 – slab span; 2 – main shoe; 3 – main reinforced bound pile; 4 – added shoe; 5 – added piles; 6 – daylight surface; 7 – ledge rock top

Рисунок 2. Поперечное сечение пролетного строения и вид опоры (разработано авторами)

Figure 2. Decking cross current and pierce type (developed by the authors)

Исходя из имеющихся в распоряжении производства материалов и строительных машин для устройства добавленных свай приняты стальные трубы наружным диаметром 426 мм с толщиной стенки 10 мм по ГОСТ 10704-91⁴. Так как в теплое время года заход строительной техники в пойменную и русловую часть не представлялся возможным, работы решено было выполнять в зимнее время, отсюда и невозможность бетонирования внутренней полости свай, в связи с чем сваи заполняются сухой цементно-песчаной смесью⁵, которая впоследствии затвердевает, постепенно набирая влагу. Заполнение внутренней полости свай

³ Свод правил. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 / ОАО НИЦ «Строительство». – М.: Минрегион России, 2011.

⁴ ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент / Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2007, – 7 с.

⁵ ГОСТ 31357-2007. Смеси сухие на цементном вяжущем. Общие технические условия / Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2008, – 10 с.

необходимо для исключения заполнения ее водой с последующим замерзанием и для обеспечения местной устойчивости стенки стальной трубы. При этом в расчетах добавленных свай на прочность и продольную устойчивость внутреннее их заполнение не учитывается.

Расчетное обоснование принятых решений

Justifying calculations for made decisions

В первое время после погружения в толщу талых со слабой консистенцией грунтов, которые в силу своей тиксотропности смогут загустеть и уплотниться позже, добавленную сваю вначале следует рассматривать как свободную стойку с шарнирным опиранием нижним концом в скальный грунт.

Расчет добавленных свай-труб при неблагоприятном из возможных вариантов их загрузки по схеме продольно сжатой стойки выполнен в соответствии с положениями норм СП 35.13330.2011⁶. В основе расчета – условие прочности и устойчивости сваи как центрально сжатого стержня.

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \varphi R_y m, \quad (1)$$

где N – продольное усилие на сваю; A – площадь кольцевого сечения сваи-трубы; φ – коэффициент продольного изгиба; R_y – расчетное сопротивление стали трубы; $m = 1$ – коэффициент условий работы.

Для стали марки ВСтЗсп, из которой изготовлена труба, расчетное сопротивление в соответствии с СП 35.13330.2011⁶ $R_y = 205$ МПа, а коэффициент продольного изгиба φ определяется по приложению «Ф»⁶ в зависимости от гибкости λ , определяемой по формуле⁶:

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}; \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}}, \quad (2)$$

где l_{ef} – расчетная длина сваи, принимаемая в настоящем расчете как полная включая надземную часть; i – радиус инерции стального кольцевого сечения сваи; I – осевой момент инерции кольцевого сечения сваи.

Предельно допустимое усилие на сваю из условия (1)

$$N_{пред} = \varphi R_y m A. \quad (3)$$

⁶ Свод правил. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1, 2) / ОАО ЦНИИС. – М.: Стандартинформ, 2019.

В приведенных в таблице 4 данных расчетное усилие на сваю получено сбором постоянной и временной нагрузок при самом неблагоприятном варианте загрузки.

Таблица 4 / Table 4

Результаты расчета добавленных свай из стальных труб 426x10 мм
Calculation results of added piles made of steel tubes 426x10 mm

Расчетные параметры Calculated parameter				Критерии оценки Evaluation indicator		
Площадь сечения A , см ² Cross-sectional area A , cm ²	Радиус инерции i , см The radius of gyration i , cm	Гибкость λ ; коэф-т прод. изгиба φ Flexibility λ ; columnar deflection coeff φ	Марка стали; R_y , МПа steel grade; R_y , MPa	Предельное усилие на сваю $N_{пред}$, кН Critical force on the pile N_{crit} , kN	Расчетное усилие на сваю $N_{расч}$, кН Rated force on the pile N_{rat} , kN	Предельная гибкость элемента $\lambda_{пред}$ Element limit slenderness λ_{lim}
130,62	14,72	88,3 0,50	ВСт3сп, 205	1338,8	732,19	120

Составлено авторами / Compiled by the authors

Результаты первого этапа расчета, приведенные в таблице 4, свидетельствуют о обеспеченной прочности и продольной устойчивости добавленных свай из стальных труб.

Из дальнейшего комплекса расчетов свайного фундамента отметим результаты, связанные с устойчивостью основания, окружающего сваю, отражающие последующую за ее погружением консолидацию талых грунтов по боковой поверхности. Все физико-механические характеристики талых грунтов, залегающих в расположении свай опор № 4, 5, 6, как получивших наибольшие просадки, были учтены в расчете ограничения давления, оказываемого на грунт боковой поверхностью свай, выполненном в программном комплексе «Опора-Х» в соответствии с приложением «Д» СП 50-102-2003⁷.

Основные результаты расчета устойчивости основания, окружающего сваю, сведены в таблицу 5.

Как видно, боковое давление σ_z , оказываемое добавленными сваями на окружающий талый грунт не превышает его предельных значений $\sigma_{z,пред}$.

С появлением технической возможности обработки больших массивов данных в инженерной практике успешно применяются численные приемы моделирования, в частности метод конечных элементов в области стальных конструкций и дорожных сооружений [16; 17], прорабатываются модели взаимодействия свай с просадочными грунтами [18].

⁷ Свод правил. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов / ГОССТРОЙ РОССИИ. – М.: ФГУП ЦПП, 2004, – 82 с.

Таблица 5 / Table 5

Результаты расчета добавленных свай
на ограничение бокового давления на грунт

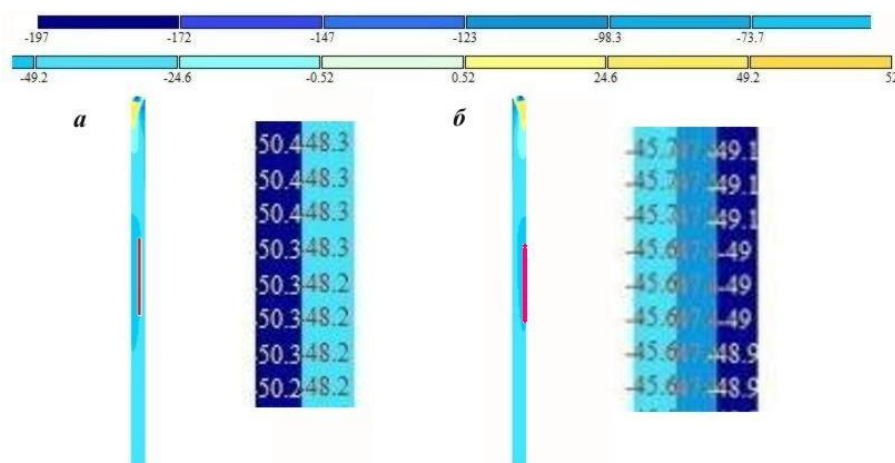
Added piles calculation results for lateral subfoundation pressure limitation

Параметры Parameters	Обозначение Designation	Опора № 4 Pierce № 4		Опора № 5 Pierce № 5		Опора № 6 Pierce № 6	
Усилия в голове свай Pressure in the pile head	Н, кН	11,49	0	22,98	0	22,98	0
	М, кН·м	0	31,04	0	59,84	0	61,52
Усилия и перемещения на уровне расчетной поверхности грунта Pressure and motion at the reference subfoundation surface level	Момент M_0 , кН·м	28,16	31,04	73,55	59,84	76,99	61,53
	Горизонтальное U_0 , м	0,0021	0,0015	0,0051	0,0028	0,0052	0,003
	Поворот ψ_0 , рад	0,002	0,0016	0,0048	0,003	0,005	0,0031
Предельное давление боковой поверхности свай на грунт Lateral pile surface critical pressure to the subfoundation	$\sigma_{z,пред}$, кПа	96,75	38,70	96,75	38,7	96,75	38,7
Расчетное давление на грунт боковой поверхности свай Rated subfoundation pressure of the lateral pile surface	σ_z , кПа	7,38	1,71	15,71	3,29	15,90	3,39

Составлено авторами / compiled by the authors

Для уточнения напряженного состояния металла добавленных свай проведен их расчет в составе опоры по схеме конечно-элементного моделирования. Были разработаны модели однорядной опоры с применением добавленных свай из стальных труб 426x10 мм; работа двухрядных опор не моделировалась, т. к. при том же нагружении и участии вдвое большего числа железобетонных свай положение добавленных свай будет более благоприятным. Из ресурсного обеспечения программного комплекса «ЛИРА-САПР» в создании ригеля, элементов его усиления, сопряжения со сваями задействован объемный конечный элемент, в качестве главного рабочего конечного элемента для свай-труб применена пластина с назначением модуля упругости и плотности. В конечно-элементных моделях, обрабатываемых программой, временная нагрузка прилагалась несимметрично, по самой неблагоприятной для добавленных свай схеме. Фрагмент мозаики максимальных напряжений для добавленных свай однорядной опоры при несимметричном расположении временной нагрузки (максимально допустимое смещение в левую сторону) приведен на рисунке 3.

Подтверждено выполнение условия прочности и устойчивости с привлечением коэффициента продольного изгиба ϕ из таблицы 4 конечно-элементным моделированием с помощью программного комплекса «ЛИРА-САПР», таблица 6.



a – левая свая; *б* – правая свая; численные значения напряжений отражены в МПа
a – left pile; *b* – right pile; stresses are numerical values reported in MPa

Рисунок 3. Фрагмент мозаики напряжений в металле добавленных свай однорядной опоры (разработано авторами)

Figure 3. A fragment of the stresses in the metal mosaic of the added piles of a single-chain pierce (developed by the authors)

Таблица 6 / Table 6

Результат оценки напряженного состояния металла добавленных свай конечно-элементным моделированием

The evaluation result of the metal stress state of added piles finite-element designing

Сечение трубы Pipe section area	$\sigma_{\text{макс}}$, МПа	φ	$\sigma_{\text{макс}} / \varphi$	R_y , МПа	Условие прочности и устойчивости Strength state condition and stability conditions
426x10 мм	50,4	0,5	100,8	$R_y, \text{BCr3сп} = 205$	Выполняется Performed

Составлено авторами / Compiled by the authors

Заключение

Conclusion

1. Процесс деградации многолетней мерзлоты с понижением ее кровли, увеличением толщины активного слоя, потерей потребительских качеств оттаявших грунтов – явление еще недостаточно изученное и требующее пристального внимания исследователей, проектировщиков, строителей и эксплуатационников инженерных сооружений.

2. Известны множественные случаи потери несущей способности и просадок опор мостов, фундаменты которых запроектированы по I принципу на многолетнемерзлых грунтах.

3. Требуют дополнительного изучения и развития различные методы сохранности грунтов оснований в мерзлом состоянии – химический способ с засолением грунта, инженерно-мелиоративный с дренажом и водоотводом, механический с заменой грунта и утеплением, однако для

мостовых опор в пределах русловых и пойменных участков все эти меры крайне сложны и малоэффективны или вовсе невозможны.

4. Решением проблемы при новом проектировании можно считать более глубокое заложение фундаментов в многолетнемерзлый грунт, в идеале – опирание их на скальное основание.

5. В настоящей статье рассмотрен способ повышения несущей способности и стабилизации положения опор моста путем их усиления добавленными сваями, погруженными до скального основания.

6. Расчетным путем подтверждено предположение о причинах значительных осадок мостовых опор и обоснована эффективность предложенных конструктивных мер усиления.

Дальнейшие исследования полагаем в продолжении мониторинга мостовых сооружений, возведенных на многолетнемерзлых грунтах, сбора и анализа фактических данных и в разработке решений и рекомендаций по обеспечению нормативного состояния объектов транспортной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Конищев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата / В.Н. Конищев // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2009. – № 4. – С. 10–20. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13024846> (дата обращения: 12.06.2020). – Рез. англ.
2. Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters / под редакцией J.F. Shroder, W. Haeberli, C. Whiteman. – DOI [10.1016/C2011-0-07024-2](https://doi.org/10.1016/C2011-0-07024-2) // Boston: Academic Press, 2015. – 812 с. – URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123948496/snow-and-ice-related-hazards-risks-and-disasters> (дата обращения: 07.06.2020).
3. **Struzik E.** How Thawing Permafrost Is Beginning to Transform the Arctic / E. Struzik // Yale Environment 360. – 2020. – URL: <https://e360.yale.edu/features/how-melting-permafrost-is-beginning-to-transform-the-arctic> (дата обращения: 22.05.2020).
4. **Maslakov A.** Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models / A. Maslakov, N. Shabanova, D. Zamolodchikov, V. Volobuev, G. Kraev. – DOI [10.3390/geosciences9050232](https://doi.org/10.3390/geosciences9050232) // Geosciences. – 2019. – Т 9, № 4. – С. 232. – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/5/232> (дата обращения: 07.05.2020).
5. **Tsygankova Yu.S.** The Problem of Thawing Permafrost and Methods for its Solution / Yu.S. Tsygankova, M.A. Dmitrienko. – DOI [10.1051/mateconf/20153701060](https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701060) // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Т 37. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2015/18/mateconf_sg2015_01060/mateconf_sg2015_01060.html (дата обращения: 26.04.2020).
6. **Анисимов О.А.** Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК / О.А. Анисимов, С.А. Лавров // Научно-технический журнал «Технологии топливно-энергетического комплекса». – 2004. – № 3. – С. 78–83. – URL: <https://oilcapital.ru/news/markets/07-06-2004/globalnoe->

- [poteplenie-i-tayanie-vechnoy-merzloty-otsenka-riskov-dlya-proizvodstvennyh-ob-ektov-tek-rf](#) (дата обращения: 08.05.2020).
7. **Исаков В.А.** Температурный режим в основаниях дорог в вечной мерзлоте / В.А. Исаков // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2015. – № 3. – С. 25–34. – URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/139> (дата обращения: 14.06.2020).
 8. **Zhdanova S.** Analysis of roadbed destabilization causes on sections with thaw underground ice and reinforcement reconstruction measures / S. Zhdanova, O. Neratova, A. Piotrovich, O Tukmakova. – DOI [10.1051/mateconf/201926502006](https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502006) // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Т 265. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/14/mateconf_gccets2018_02006/mateconf_gccets2018_02006.html (дата обращения: 27.03.2020).
 9. **Shastunova U.** Thermal interference of engineering construction with permafrost ground as bottom / U. Shastunova, P. Michailov. – DOI [10.1051/mateconf/201710602018](https://doi.org/10.1051/mateconf/201710602018) // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Т 106. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/20/mateconf_spbw2017_02018/mateconf_spbw2017_02018.html (дата обращения: 27.03.2020).
 10. **Гулый С.А.** Анализ источников причин некоторых криогенных явлений на федеральной трассе Р-504 "Колыма" / С.А. Гулый, Н. Прелль // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). – 2013. – № 3. – С. 72–77.
 11. **Ustyay N.** Experience in the restoration of permafrost degradation areas adjacent to transport infrastructure facilities / N. Ustyay. – DOI [10.1051/mateconf/201926502011](https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502011) // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Т 265. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/14/mateconf_gccets2018_02011/mateconf_gccets2018_02011.html (дата обращения: 29.03.2020).
 12. **Passek V.** The Use of Sheds for Thermal Management of the Permafrost Bases / V. Passek, A. Tsernant. – DOI [10.1051/mateconf/20167305003](https://doi.org/10.1051/mateconf/20167305003) // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Т 73. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2016/36/mateconf_tpacee2016_05003/mateconf_tpacee2016_05003.html (дата обращения: 30.03.2020).
 13. **Pearson R.G.** Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change / R.G. Pearson, S.J. Phillips, M.M. Loranty [и др.]. – DOI [10.1038/nclimate1858](https://doi.org/10.1038/nclimate1858) // Nature Climate Change. – 2013. – Т 3, № 7. – С. 673–677. – URL: <https://www.nature.com/articles/nclimate1858> (дата обращения: 09.06.2020).
 14. **Alekseev A.** Application of pile foundations in structurally unstable soils / A. Alekseev, P. Sazonov, D. Zorin, S. Vinogradova. – DOI [10.1051/mateconf/201926505020](https://doi.org/10.1051/mateconf/201926505020) // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Т 265. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/14/mateconf_gccets2018_05020/mateconf_gccets2018_05020.html (дата обращения: 16.03.2020).
 15. **Аксёнов В.И.** Работа винтовых свай в мёрзлых грунтах / В.И. Аксёнов, С.Г. Геворкян, А.В. Иоспа, Д.Н. Кривов, И.В. Шмелёв // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2016. – Т 11, № 1. – С. – URL: http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-aprov_e-ast11-1.2016.73.php (дата обращения: 18.06.2020).

16. **Горшков Н.И.** Анализ и оценка напряженно-деформированного состояния системы «металлическая гофрированная труба (МГТ) – основание – насыпь» на основе МКЭ / Н.И. Горшков, М.А. Краснов, А.Д. Ловцов, В.С. Фёдорова. – DOI [10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160) // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3. – С. 152–160. – URL: <http://vestnik.spbgasu.ru/article/analiz-i-ocenka-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-sistemy-metallicheskaya> (дата обращения: 29.05.2020).
17. **Цимбельман Н.Я.** Сравнение методов моделирования давления обратной засыпки на сооружения из заполненных оболочек / Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, П.В. Мосина. – DOI [10.5281/zenodo.1119161](https://doi.org/10.5281/zenodo.1119161) // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2017. – № 4. – С. 56–64. – URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-33/7/> (дата обращения: 01.06.2020).
18. **Акопян А.Ф.** Моделирование работы свай при реализации просадки грунта / А.Ф. Акопян, В.Ф. Акопян, К.Ю. Подолько, М.С. Тимошенко, С.А. Боярских, Т.А. Литовченко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4266> (дата обращения: 04.06.2020).

Сведения об авторах:

Томилов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: serg_tomilov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3008-1249>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=990391

Сим Александр Денсуевич – старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: simxander@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3391-1287>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1019463

Гринёв Павел Евгеньевич – ассистент кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 011988@pnu.edu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4427-5033>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1077652
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57216510068>

Статья получена: 13.07.2020. Принята к публикации: 19.08.2020. Опубликовано онлайн: 03.09.2020.

REFERENCES

1. Konishchev V.N. Response of permafrost to the climate warming. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*. 2009; (4): 10–20. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13024846> (accessed 14th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Shroder J.F., Haeberli W., Whiteman C., ed. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. Boston: Academic Press; 2015. (In Eng.) DOI: [10.1016/C2011-0-07024-2](https://doi.org/10.1016/C2011-0-07024-2).
3. Struzik E. How Thawing Permafrost Is Beginning to Transform the Arctic. *Yale Environment 360*. 2020. Available at: <https://e360.yale.edu/features/how-melting-permafrost-is-beginning-to-transform-the-arctic> (accessed 22nd May 2020). (In Eng.) .
4. Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Volobuev V., Kraev G. Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models. *Geosciences*. 2019; 9(5): 232. (In Eng.) DOI: [10.3390/geosciences9050232](https://doi.org/10.3390/geosciences9050232).
5. Tsygankova Yu.S., Dmitrienko M.A. The Problem of Thawing Permafrost and Methods for its Solution. *MATEC Web of Conferences*. 2015; 37. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/20153701060](https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701060).
6. Anisimov O.A., Lavrov S.A. [Global warming and melting of permafrost: risk assessment for production facilities of the fuel and energy complex]. *Scientific and technical journal "Technologies of the Fuel and Energy Complex"*. 2004; (3): 78–83. Available at: <https://oilcapital.ru/news/markets/07-06-2004/globalnoe-poteplenie-i-tayanie-vechnoy-merzloty-otsenka-riskov-dlya-proizvodstvennyh-ob-ektov-tek-rf> (accessed 8th May 2020). (In Russ.).
7. Isakov V.A. Temperature regime of road basements in the permafrost. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*. 2015; (3): 25–34. Available at: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/139> (accessed 14th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Zhdanova S., Neratova O., Piotrovich A., Tukmakova O. Analysis of roadbed destabilization causes on sections with thaw underground ice and reinforcement reconstruction measures. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 265. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/201926502006](https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502006).
9. Shastunova U., Michailov P. Thermal interference of engineering construction with permafrost ground as bottom. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/201710602018](https://doi.org/10.1051/mateconf/201710602018).
10. Guly S., Prell N. A cause analysis of the cryogenic effects on the Kolyma highway P-504. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2013; (3): 72–77. (In Russ., abstract in Eng.).
11. Ustyan N. Experience in the restoration of permafrost degradation areas adjacent to transport infrastructure facilities. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 265. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/201926502011](https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502011).
12. Passek V., Tsernant A. The Use of Sheds for Thermal Management of the Permafrost Bases. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 73. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/20167305003](https://doi.org/10.1051/mateconf/20167305003).

13. Pearson R.G., Phillips S.J., Loranty M.M., Beck P.S.A., Damoulas T., Knight S.J., et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature Climate Change*. 2013; 3(7): 673–677. (In Eng.) DOI: [10.1038/nclimate1858](https://doi.org/10.1038/nclimate1858).
14. Alekseev A., Sazonov P., Zorin D., Vinogradova S. Application of pile foundations in structurally unstable soils. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 265. (In Eng.) DOI: [10.1051/mateconf/201926505020](https://doi.org/10.1051/mateconf/201926505020).
15. Aksenov V.I., Gevorkyan S.G., Iospa A.V., Krivov D.N., Shmelev I.V. The Work of Screw Piles into Frozen Soils. *Electronic Scientific Edition of e-Almanac Space and Time*. 2016; 11(1). Available at: http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-aprovr_e-ast11-1.2016.73.php (accessed 18th June 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Gorshkov N.I., Krasnov M.A., Lovtsov A.D., Fedorova V.S. Analysis and evaluation of the stress-strain state of the “steel corrugated pipe (SCP) – foundation – backfill” system based on FEM. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019;(3): 152–160. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160).
17. Tsimbelman N., Chernova T., Mosina P. The comparison of simulation methods for backfill soil pressure on filled shell structures. *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2017; (4): 56–64. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [10.5281/zenodo.1119161](https://doi.org/10.5281/zenodo.1119161).
18. Akopyan A.F., Akopyan V.F., Podol’ko K.Yu., Timoshenko M.S., Boyarskikh S.A., Litovchenko T.A. [Modeling the work of piles in the implementation of soil subsidence]. *Engineering Journal of Don*. 2017; (3). Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4266> (accessed 4th June 2020). (In Russ.).

Information about the authors:

Sergey N. Tomilov – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: serg_tomilov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3008-1249>
РИИЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=990391

Alexander D. Sim – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: simxander@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3391-1287>
РИИЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1019463

Pavel E. Grinev – Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 011988@pnu.edu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4427-5033>
РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1077652
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57216510068>

Submitted: 13th July 2020. Revised: 19th August 2020. Published online: 3rd September 2020.