

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.340 (571.1)

ОЦЕНКА УЩЕРБА ЖИЛЫМ И ПРОМЫШЛЕННЫМ ЗДАНИЯМ И СООРУЖЕНИЯМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУР И ОТТАИВАНИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА

© 2021 г. В. П. Мельников^{1,2,*}, В. И. Осипов^{3,**}, А. В. Брушков^{4,***}, С. В. Бадина^{5,6,****},
Д. С. Дроздов¹, В. А. Дубровин^{7,*****}, М. Н. Железняк^{8,*****}, М. Р. Садуртдинов¹,
Д. О. Сергеев^{3,*****}, Н. А. Остарков^{9,*****}, А. А. Фалалеева⁴, Я. Ю. Шелков⁴

¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, ул. Малыгина, д. 86, Тюмень, 625026 Россия

² АНО “Губернская академия”, ул. Малыгина, д. 86, Тюмень, 625026 Россия

³ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

⁴ МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991 Россия

⁵ Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Нахимовский пр., д. 47, Москва, 117418 Россия

⁶ ФГБОУ ВО “РЭУ им. Г.В. Плеханова”, Стремянный пер., д. 36, Москва, 117997 Россия

⁷ ФГБУ “Гидроспецгеология”, ул. Маршала Рыбалко, д. 4, Москва, 123060 Россия

⁸ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, Якутск, 677010 Россия

⁹ ФАНУ “Востокгосплан”, ул. Льва Толстого, д. 8, Хабаровск, 680000 Россия

*E-mail: sciensec@ikz.ru

**E-mail: osipov@geoenv.ru

***E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

****E-mail: bad412@yandex.ru,

*****E-mail: info@specgeo.ru

*****E-mail: fe@mpi.ysn.ru,

*****E-mail: sergueevdo@mail.ru,

*****E-mail: n.ostarkov@vostokgosplan.ru

Поступила в редакцию 16.11.2020 г.

После доработки 25.11.2020 г.

Принята к публикации 26.11.2020 г.

В настоящей работе предпринята попытка оценки возможного ущерба от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений для различных сценариев потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ, расположенных в криолитозоне. Предполагаемое изменение среднегодовых температур грунтов в выделенных муниципальных образованиях АЗРФ взято из прогнозных данных Климатического центра Росгидромета и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, по трендам изменения температур воздуха и грунтов и фактическим данным по изменениям температур в основаниях зданий. Затем проводились расчеты для возможных вариантов изменения температур грунтов. Среднегодовая температура грунтов (СГТГ) отличается от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) на величину общей сдвижки, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, температурной сдвижки и влияния атмосферных осадков. Общая сдвижка оценивалась двумя способами – расчетным, с учетом возможных изменений параметров в связи с изменением климата, и по данным об общей сдвижке, наблюдаемой в районах АЗРФ. Возможные сценарии учитывались как отдельные варианты, и определялся максимальный и минимальный ущерб при различных (крайних) значениях характеристик грунтов. Принималось, что основная часть зданий и сооружений построена с сохранением мерзлого основания грунтов, а в качестве фундамента выбирались наиболее распространенныеисячие сваи. Оценивалось изменение их несущей способности, беря в расчет развитие деформаций в случае, если это изменение превышало запас прочности по СП 25.13330.2012. Авторы предлагают свой вариант методического подхода к прогнозированию ущерба в криолитозоне. Наибольшие ущербы в контексте прогнозируемых изменений связаны с жилищным фондом и зданиями и сооружениями отраслей экономики. В целях оценки стоимости жилфонда была создана база данных муниципальных образований регионов АЗРФ, включающая адрес жилого дома, год ввода в эксплуатацию, площадь. Всего в базу данных вошли 23.9 тыс. жилых домов общей площадью порядка 44.6 млн м². Для оценки стоимости зда-

ний и сооружений принималось допущение, что показатель стоимости основных фондов пропорционален объему валового производства по соответствующему виду экономической деятельности, а объем валового производства в свою очередь пропорционален фонду заработной платы с поправкой на среднеотраслевые коэффициенты, полученные для регионов России. Можно предполагать ущерб для зданий и инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 5–7 трлн руб., что в целом согласуется с другими оценками. Ущерб жилому фонду ожидается на порядок меньше, около 700 млрд руб.

Ключевые слова: оценка ущерба, Арктическая зона Российской Федерации, многолетнемерзлые породы, изменения температуры, оттаивание, жилые и промышленные здания, несущая способность мерзлых грунтов

DOI: 10.31857/S0869780921010070

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, криолитозона покрывает около 24% суши в северном полушарии и содержит почти половину всего органического углерода (вероятно, около 1700 млрд т) от его общего количества в почве планеты, и в 4 раза больше, чем уже было выброшено людьми после промышленной революции [12]. Даже если часть парниковых газов, сохраняющихся в многолетнемерзлых породах (ММП) и способных образоваться при их оттаивании, попадет в атмосферу, это будет иметь серьезные последствия для всей климатической системы Земли. Температура верхних горизонтов ММП повышается гораздо быстрее, чем температура воздуха в Арктике, и за последние 30 лет выросла примерно на 1.5–2.5°C. В результате потепления к концу XXI в. может произойти протаивание от 30% до 85% верхних горизонтов криолитозоны с разрушением инфраструктуры и необратимыми изменениями ландшафтов. Оттаивание ММП может привести к появлению вредных микроорганизмов, как это случилось в 2016 г., когда вспышка сибирской язвы стала причиной госпитализации более 70 человек на Ямале, гибели ребенка и более 2300 северных оленей.

Климатические изменения являются причиной экономического ущерба [8, 11, 12, 17]. Было показано [9], что в XXI в. ущерб от дополнительного потепления, вызванного уменьшением альбедо из-за потери морского льда и снега, а также эмиссии метана, добавится к ежегодному ущербу от потепления, который оценивается от 7.5 трлн до 91.3 трлн US \$ ежегодно. Согласно [17], оттаивание ММП добавит около 70 трлн US \$ к общему ущербу, если планета нагреется на 3°C к 2100 г. Даже если потепление составит только около 1.5°C, дополнительно будет потеряно в целом 24.8 трлн US \$. По другим оценкам, оттаивание мерзлоты в Арктике будет стоить обществу 43 трлн US \$ до конца столетия [11]. Считается, что проблемы оттаивания ММП коснутся около 4 млн человек в мире и примерно 70% существующей инфраструктуры. При этом треть инфраструктуры и около 45% месторождений углеводородов пострадают в Российской Арктике [10].

Было показано [13], что только для Аляски потепление обойдется примерно в 1.6–2.1 млрд US \$ ущерба до 2099 г. Одним из примеров является международный аэропорт в Гренландии, где около 300 м взлетной полосы недавно пострадали в результате осадки при оттаивании, а стоимость ремонта составит 270 млн €, по данным строительной компании KJ Greenland. РБК сообщало, что Росприроднадзор оценил сумму экологического ущерба от разлива топлива летом 2020 г. на ТЭЦ-3 “Норникеля” почти в 148 млрд руб.

Действительно, в первую очередь нарушится устойчивость зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Экономический ущерб в Российской Арктике к настоящему времени оценен в работе [16] и касается всей области криолитозоны России: он составит от 50 до 150 млрд руб. (2.3 млрд US \$) в год. При этом был выбран наихудший (максимальный) сценарий климатического потепления. В работе говорится, что авторы оценивали изменение несущей способности грунтов. В качестве методологической базы оценки таких явлений использовались результаты, полученные ранее и основанные на авторских геотехнических моделях изменений ММП [15]. Кроме того, в работе [5] рассматриваются 3 сценария изменения устойчивости дорожной инфраструктуры под влиянием протаивания в девяти регионах Российской Арктики. Показано, что при инерционном (консервативном) сценарии развития дорожной инфраструктуры в 2020–2050 гг. капитальные затраты на поддержание ее устойчивости и снижение рисков разрушения под влиянием протаивания и деградации ММП составят в среднем не менее 14 млрд руб. в год, при умеренном и модернизационном сценариях превысят 21 и 28 млрд руб. соответственно. Максимальные показатели будут характерны для Республики Саха (Якутия), Магаданской обл. и Чукотского АО.

Цель настоящей работы — попытка оценить возможный ущерб от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений при различных сценариях потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г.

2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЩЕРБА

Методика оценки ущерба состояла из нескольких стадий: 1) оценивались возможные сценарии изменения температур воздуха в выделенных районах; 2) оценивались возможные изменения температур мерзлых грунтов; 3) оценивалось изменение несущей способности грунтов; 4) выполнялась оценка ущерба. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ¹, расположенных в районах развития ММП.

2.1. Оценка температур воздуха в выделенных районах

Оценка возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных муниципальных образованиях (МО) АЗРФ выполнялась на основе прогнозных данных Климатического центра Росгидромета “Изменение климата России в 21-м веке” [3] и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 [12]. При этом учитывался диапазон изменений среднегодовых температур воздуха по различным сценариям (табл. 1). В дальнейшем все три сценария учитывались как отдельные варианты, и по ним определяли максимальный и минимальный ущерб.

2.2. Оценка возможных температур мерзлых грунтов

Среднегодовая температура грунтов (СГТГ) отличается от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) на величину общей сдвижки, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, водного покрова, температурной сдвижки и влияния атмосферных осадков. Общая сдвижка оценивалась двумя способами – расчетным, с учетом возможных изменений параметров в связи с изменением климата, и по данным об общей сдвижке, наблюдаемой в районах АЗРФ [2]. Оба значения сравнивались и в дальнейшем учитывались в оценке ущерба как различные варианты. Расчет выполнялся в соответствии с методикой, изложенной в [4]. При этом по грунтовым условиям и характеристикам грунтов, а также характеристикам покровов и других факторов, влияющих на температурный режим, выбирался реалистичный диапазон их изменения, и расчеты выполнялись для крайних значений выбранных диапазонов характеристик (табл. 2).

При этом предполагалось, что на строительных площадках и непосредственно под зданиями снежный и растительный покровы отсутствуют, что является типичным случаем для большинства

зданий. Разница температур грунтов в естественных условиях и на застроенной (нарушенной) территории, а также разница между температурами воздуха и температурами грунтов на застроенной (нарушенной) территории назначалась в основном по [2].

2.3. Оценка изменения несущей способности грунтов

Для оценки изменения несущей способности грунтов принимается, что основная часть зданий и сооружений в АЗРФ построена по I принципу строительства с сохранением мерзлого основания грунтов. В качестве фундамента выбираются висячие сваи как наиболее распространенный вариант. Сначала оценивается их несущая способность в настоящий момент, которая, как предполагается, должна соответствовать несущей способности, определенной в проекте. Затем проводятся расчеты для всех возможных вариантов изменения температур грунтов.

При этом учитывались заложенные в СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” [6] допущения возможности повышения температур основания для песчаных и крупнообломочных грунтов на 0.5°C, а для глинистых на 1.0°C без ущерба для несущей способности оснований. Таким образом, из прогнозного повышения температуры вычиталось 0.5°C для песчаных грунтов и 1.0°C для глинистых грунтов там, где значение изменения температуры превышало 1.0°C.

Величины несущей способности в настоящее время и к середине столетия в соответствии с прогнозом повышения температуры основания сравнивались, и, если сокращение несущей способности в результате потепления грунтов основания составляло 15%, фундамент здания считался потерявшим несущую способность в соответствии с п. 7.2.1 СП 25.13330.2012 и п. 5.7.2 СП 22.13330.2016 “Основания зданий и сооружений”². Эти разделы определяют коэффициент надежности по ответственности, принимаемый равным 1.2, 1.15 и 1.10, соответственно, для сооружений геотехнических категорий 3, 2 и 1. Большинство зданий относится к категории 2, поэтому для оценки устойчивости выбрано значение уменьшения несущей способности на 15%.

Методика расчета несущей способности по СП 25.13330.2012, в соответствии с правилами, заключается в следующем. Прежде всего, определяются расчетные характеристики механических свойств грунтов (длительной прочности). Расчет оснований фундаментов по первой группе предельных состояний (по несущей способно-

¹ АЗРФ рассмотрена в границах, установленных Указом Президента Российской Федерации от 02.05.2014 г. № 296 “О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации” с последующими редакциями.

² URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>

Таблица 1. Изменения среднегодовых температур воздуха на середину XXI в. по различным сценариям для некоторых муниципальных образований АЗРФ (пример для 7 МО)

Муниципальные образования (МО)	Название метеостанции	Среднегодовая температура воздуха в настоящее время и в соответствии со сценариями потепления к 2050 г., $t_{в.ср.}$, °С
Абыйский муниципальный район	Усть-Мома	-13.2
	RCP 2.6	-10.8
	RCP 4.5	-10.1
	RCP 8.5	-9.3
Анабарский национальный (долгановский) муниципальный район	Саскылах	-14.1
	RCP 2.6	-11.7
	RCP 4.5	-11.0
	RCP 8.5	-10.2
Анадырский муниципальный район	Марково	-7.9
	RCP 2.6	-5.0
	RCP 4.5	-4.5
	RCP 8.5	-3.5
Билибинский муниципальный район	Илирней	-12.7
	RCP 2.6	-9.8
	RCP 4.5	-9.3
	RCP 8.5	-8.3
Верхнеколымский муниципальный район	Зырянка	-10.5
	RCP 2.6	-8.1
	RCP 4.5	-7.4
	RCP 8.5	-6.6
Верхоянский муниципальный район	Верхоянск	-14.5
	RCP 2.6	-12.1
	RCP 4.5	-11.4
	RCP 8.5	-10.6
Городской округ Воркута	Воркута	-5.4
	RCP 2.6	-2.5
	RCP 4.5	-1.9
	RCP 8.5	-1.0

Таблица 2. Диапазон теплофизических характеристик грунтов, принятый в расчетах

Теплота таяния (замерзания) грунта, L_v , Дж/м ³		Объемная теплоемкость грунта, Дж/(м ³ °С)				Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м °С)			
		талого		мерзлого		талого		мерзлого	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
$8.368 \cdot 10^7$	$1.464 \cdot 10^8$	$2.720 \cdot 10^6$	$3.766 \cdot 10^6$	$2.510 \cdot 10^6$	$3.347 \cdot 10^6$	1.10	1.30	1.20	1.70

сти) производится, исходя из условия (п. 7.2.1 СП 25.13330.2012)

$$F \leq F_u/\gamma_n, \quad (1)$$

где F – расчетная нагрузка на основание; F_u – несущая способность основания, определяемая расчетом (п. 7.2.2 СП 25.13330.2012).

При этом расчетные температуры грунтов T_z (на глубине z) и T_e (средней, эквивалентной температуре по глубине заложения сваи) определяются расчетом теплового взаимодействия сооружения с многолетнемерзлыми грунтами основания в периодически установившемся тепловом

режиме с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности, формы и размеров сооружения, глубины заложения и расположения фундаментов в плане, а также теплового режима сооружения и принятых способов и средств сохранения мерзлого состояния грунтов основания. В наших расчетах значения R_{af} (прочность смерзания грунта с материалом сваи) принимались при средней (эквивалентной) температуре грунта T_e в соответствии с п. 7.2.7 СП 25.13330.2012.

При расчетах многолетнемерзлых оснований по несущей способности расчетные температуры грунтов T_z и T_e принимались равными: T_e – максимальной в годовом периоде средней по глубине заложения фундамента z_d температуре многолетнемерзлого грунта в установившемся эксплуатационном режиме (эквивалентная температура грунта) при условии, что на глубине нулевых годовых амплитуд установилась температура СГТГ; T_z – температура многолетнемерзлого грунта на данной глубине z от его верхней поверхности, принимаемой для наших расчетов оценки ущерба равной СГТГ, т.е. считая, что сваи имеют достаточную длину, сравнимую с глубиной нулевых годовых амплитуд, что, как правило, соответствует действительности, особенно для тяжелых и больших зданий или инженерных сооружений.

В наших расчетах мы не учитывали снижение прочности под нижним концом сваи, принимая, что несущая способность свайного фундамента в основном обеспечивается прочностью смерзания. Ввиду того, что под серединой сооружения температуры часто выше, в расчет брались именно значения температур под серединой сооружения, и в этом случае коэффициент α_e по СП 25.13330.2012 оказывается близким к 0.5. Коэффициент k_1 теплового влияния сооружения изменяется в небольшом диапазоне и в среднем, по видимому, может быть принятым равным 0.5. Температура начала замерзания грунта, T_{bf} , в целом, находится в диапазоне от -0.1°C до -0.25°C и незначительно влияет на результаты расчетов, поэтому мы принимали ее равной в среднем -0.15°C .

В первом варианте расчетов мы исходили из следующего. Нормативное значение среднегодовой температуры многолетнемерзлого грунта T_{0n} определяется по данным полевых измерений температуры грунтов на опытных площадках с естественными условиями. Допускается значение T_{0n} принимать равным температуре грунта на глубине 10 м от поверхности. Практически невозможно установить, каким образом в каждом конкретном случае изыскатели и проектировщики определяли расчетную среднегодовую температуру мерзлого грунта. Принимался оптимистичный вариант, что их оценки и расчеты были правильными,

и она близка в настоящее время к фактической. От том, что, вероятнее всего, они ее занижали, свидетельствует значительное количество деформаций зданий и сооружений в АЗРФ. При этом, конечно, будущее рискует быть еще более пессимистичным, чем оценки, которые мы даем в настоящей работе.

При оценке изменений температур в МО АЗРФ нами были также использованы следующие фактические данные: разность среднегодовых температур мерзлых грунтов в естественных условиях и на территории застройки; разность среднегодовых температур воздуха и мерзлых грунтов на территории застройки в прошлом и в настоящее время, а также расчеты среднегодовых температур мерзлых грунтов в соответствии с методикой, изложенной в [4].

При этом наиболее сложной, на наш взгляд, является оценка изменения среднегодовых температур грунтов на территории застройки (нарушенной территории) по сравнению с температурами грунтов в естественных условиях. Так, для Норильского района установлено, что на территории застройки при использовании I принципа строительства (с сохранением мерзлого состояния оснований) такое изменение температур грунтов составляет от -1°C до $+2^\circ\text{C}$ [2], а для Якутска, например, по данным П.И. Мельникова, более характерно изменение температур грунтов на территории застройки около -2°C , т.е. преимущественно понижение температуры. В пос. Надежный в Норильском промышленном районе среднегодовая температура грунтов до застройки изменялась от -3°C до -4°C , а после застройки под одним из зданий она составляла от -3.1°C до -5.1°C , что свидетельствует об эффективности охлаждающей работы подполья, где, вероятно, отсутствовали растительный и снежный покровы. При застройке пос. Новый Город на участке площадки детского сада был удален почвенно-растительный слой, частично удален снежный покров, и температура повысилась на 0.4°C . На другом участке с теми же нарушениями температура, наоборот, понизилась на 0.6°C . Первые наблюдения за температурами грунтов под зданиями с проветриваемыми подпольем в Якутске проводились еще Г.О. Лукиным в 1950–1956 гг., в результате которых было установлено, что наибольшее понижение температуры грунта под зданием происходит в первые 2–3 года после начала эксплуатации и составляет $3–4^\circ\text{C}$ на глубине 6 м и 0.3°C на глубине 18 м [2].

Вне контура зданий температура грунта в населенных пунктах Центральной Якутии, по данным П.А. Соловьева, значительно понижается по сравнению с температурой в естественных условиях. Так, для Якутска для застройки возрастом 200–300 лет такое понижение температур состав-

ляет от 4°C до 6°C, для застройки возрастом 50–100 лет от 2°C до 4°C, и для застройки возрастом 20–30 лет понижение температуры составляет от 1°C до 2°C. При этом для пос. Чурапча понижение температуры на территории застройки составляет 2–3°C, а для пос. Абадах от 1°C до 2°C [2]. Это явление понижения температуры на территории застройки впервые отмечал еще А.Ф. Миддендорф в 1940-х годах XIX в., М.И. Сумгин объяснял его уборкой и уплотнением снега, Н.И. Салтыков – образованием “культурного слоя”, а П.И. Мельников – засолением грунтов. Однако в черте современной застройки роль этих факторов, или, по крайней мере, двух последних, по-видимому, незначительна из-за устройства канализации.

Необходимо учитывать, что среднегодовая температура воздуха в подполье зданий выше, чем снаружи, на 1–3°C в г. Норильске и на 0.2–1°C в г. Якутске [2]. При этом на поверхности грунта под зданиями формируется среднегодовая температура, близкая к среднегодовой температуре воздуха в подполье. Последняя ниже температуры поверхности грунта в естественных условиях на величины поправок на влияние снега, растительности и радиации, составляющих в сумме 6–8°C и более. Поэтому в целом, если не происходит нарушений при строительстве и эксплуатации, наблюдается понижение температур грунтов на застроенной территории. Если подполье обеспечивает надлежащее охлаждение, в Норильске, по данным М.В. Кима, наблюдается понижение температуры по сравнению с естественными условиями от –3°C до –6°C, в Якутске от –1°C до –3°C, а в Игарке от –0.5°C до –1.5°C.

Во втором варианте наших расчетов, когда температура в основании сооружения определялась по СП 25.13330.2012, мы исходили из того, что допускается определять расчетное значение среднегодовой температуры грунтов T_0 по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{t_y} \left[(T_{f,m} - T_{bf}) t_{f,m} + L_v d_{th,n} \left(\frac{d_{th,n}}{2\lambda_f} + R_s \right) \right] + T_{bf}, \quad (2)$$

где t_y – продолжительность года, принимаемая равной $3.15 \cdot 10^7$ с (8760 ч); $T_{f,m}$ и $t_{f,m}$ – соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха в период отрицательных температур, и продолжительность этого периода, принимаемые по СП 131.13330³; $d_{th,n}$ – нормативная глубина сезонного оттаивания, для предварительных расчетов допускается принимать по формулам Г.1 и Г.2 СП 25.13330.2012; L_v – теплота таяния (замерзания) грунта, определяемая по приложению Б; R_s – термическое сопротивление

снежного покрова, которое мы считали незначительным для условий подполья.

В практике проектирования такое назначение среднегодовой температуры фактически, по-видимому, производится довольно часто, поскольку гарантирует защиту от ошибок при определении фактических температур грунтов при изысканиях. Учитывая это, в своей работе мы также приводим такой расчет как один из вариантов оценки изменения температурного режима грунтов при потеплении и, соответственно, ущерба зданиям и сооружениям. Наибольшие и наименьшие изменения температур грунтов, таким образом, будут определяться сочетаниями грунтовых условий и изменениями глубин протаивания вместе с климатическими изменениями. Изменение мощности и плотности снега в связи с изменением климата в этом варианте расчета не учитывалось потому, что, во-первых, в ряде сценариев климата предполагается увеличение зимних осадков, особенно в восточной части АЗРФ, а во-вторых, что важнее, снежный покров в подполье, как правило, не формируется.

Для прогноза изменения температур воздуха в середине XXI столетия использовались данные из “Второго оценочного доклада изменения климата на территории Российской Федерации” (2014) Росгидромета [1]. Они отражают результаты расчетов будущих изменений климата на территории России с помощью ансамбля глобальных климатических моделей, рассматриваемых в 5-й фазе международного проекта сравнения объединенных моделей (CMIP5). По сравнению с моделями предыдущей фазы проекта CMIP3, модели CMIP5 характеризуются в среднем более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в описании климатических процессов. Результаты расчетов климата с этими моделями используются в Пятом оценочном докладе МГЭИК (2013 г.). В этих расчетах приводятся оценки для новых сценариев изменения содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере RCP4.5 и RCP8.5. Пятый оценочный доклад МГЭИК [12] рассматривает 4 сценария, при которых концентрация парниковых газов к 2100 г. достигнет 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) и 936 ppm (RCP8.5). Для разных сценариев доступно разное количество моделей, однако во всех случаях – достаточное с позиций репрезентативности. Изменения климата (средние за 20 лет значения климатических характеристик) рассматриваются для середины XXI в. (2041–2060 гг.), по отношению к базовому климатическому периоду 1981–2000 гг. В докладе Росгидромета [1] приводятся изменения температуры приземного воздуха, суммарных осадков, разности осадков и испарения, которые использовались нами для оценок. При этом там, к сожалению, не рассматриваются изменения продол-

³ URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546>

жительности холодного и теплого периодов для различных районов, которые необходимы для расчетов температурного режима.

В среднем для России число дней со снегом сокращается на 0.75 дня за 10 лет (Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2018 г., Росгидромет, 2018⁴). По данным World Meteorological Organization (WMO)⁵, к середине XXI в. ожидается почти повсеместное сокращение числа морозных дней в году (т.е. дней с минимальной суточной температурой ниже 0°C) на 20–30 суток. Таким образом, нами было принято уменьшение продолжительности зимнего периода к середине столетия на 20 суток, что, скорее, является минимальной оценкой.

Как сказано выше, оценка ущерба, базирующаяся на учете изменения несущей способности грунтов основания, может основываться на использовании коэффициентов надежности по ответственности сооружений. Если уменьшение несущей способности в результате повышения температур основания будет больше, чем допустимое по коэффициенту надежности по геотехническим категориям ответственности, здание или инженерное сооружение будет считаться вышедшим из строя. Поэтому при оценке ущерба определяющим является оценка изменений механических характеристик грунтов.

В соответствии с СП 25.13330.2012, расчетные давления на мерзлые грунты R и расчетные сопротивления мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхностям смерзания фундаментов R_{af} определяются опытным путем. Однако при отсутствии опытных данных допускается принимать значения R и R_{af} по таблицам В.1–В.11 СП 25.13330.2012. Как свидетельствует практика проектирования, так поступают достаточно часто, больше доверяя таблицам СП 25.13330.2012, чем лабораторным или полевым (проводятся сравнительно редко) испытаниям грунтов, или сравнивая эти значения и выбирая наименее благоприятный вариант. Таблицы были преобразованы в графики, по которым были определены уравнения аппроксимации в диапазоне температур 0°C ÷ –4°C, как наиболее характерном в практике строительства в АЗРФ (рис. 1).

Значения R_{af} в таблицах В.3, В.6, В.9 и В.12 следует умножать на коэффициент γ_{af} , зависящий от вида поверхности смерзания, однако в нашем случае учитывалось, что, так как, сваи в большинстве случаев бетонные, этот коэффициент принимался равным 1.

⁴ URL: <http://global-climate-change.ru/index.php/ru/component/content/article/2189-doklad>

⁵ URL: <http://seakc.meteoinfo.ru/research/34-change-climat21/130-change>

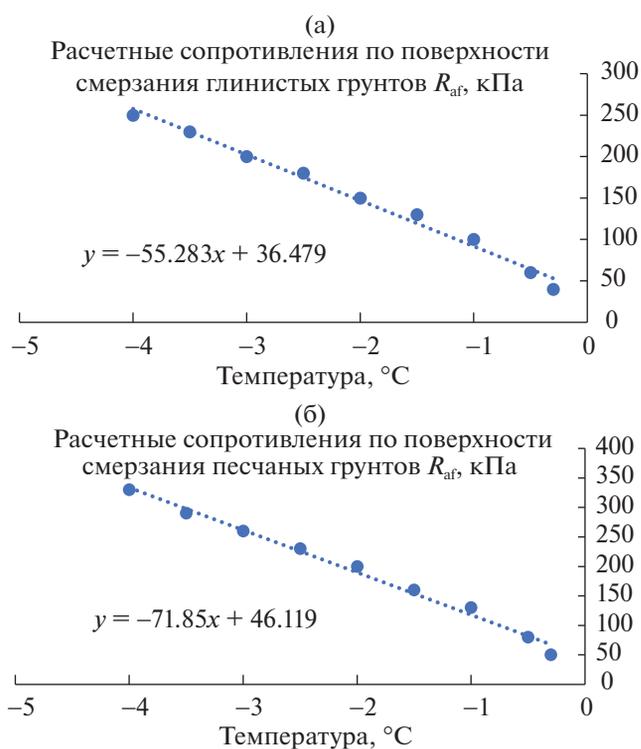


Рис. 1. Расчетные сопротивления сдвигу по поверхности смерзания незасоленного: а – глинистого грунта, б – песчаного грунта, с материалом фундамента по СП 25.13330.2012.

2.4. Методика оценки стоимости жилищного фонда и зданий и сооружений по отраслям экономики в разрезе муниципальных образований АЗРФ

В работе [14] предложен метод количественной оценки расходов на продление (замену) жизненного цикла арктической инфраструктуры. В качестве параметров были выбраны объекты линейной (дороги и трубопроводы) и точечной (здания, аэропорты и порты) инфраструктуры. Существенным упущением представляется не учет зданий и сооружений по основным отраслям экономики (промышленности, сферы услуг и пр.). Авторы утверждают, что в России в ареалы деградации многолетней мерзлоты попадет около 32% инфраструктуры. В работе [7] предложена методика оценки уязвимости социально-экономического потенциала территорий МО АЗРФ к деградации многолетней мерзлоты посредством интегральных индексов. Наряду с ключевым параметром основных фондов также присутствуют валовое производство и население, пространственные параметры. В данной методике, напротив, не учитывается жилой фонд. Эта методика больше подходит для более обширных исследований природного риска, например, прогнозирования ущербов от совокупности природных

опасностей, имеющих площадной характер воздействия (наводнений, опасных склоновых процессов и пр.). Специфика опасных геокриологических процессов в данной методике учитывается недостаточно полно.

В работе [16] в целях оценки будущих ущербов в качестве базовых использованы показатели Росстата по жилой недвижимости, нежилым коммерческим и социальным объектам, линейной инфраструктуре. И вместе с тем – данные о тяжелых машинах и промышленном оборудовании, транспортных средствах и нематериальных активах, т.е. той части основных фондов, которая значительно в меньшей степени уязвима перед деградацией многолетней мерзлоты. Авторы столкнулись с проблемой отсутствия некоторых ключевых статистических показателей на муниципальном уровне. Вводится весьма дискуссионное допущение о том, что пространственная структура основных фондов в регионе соответствует пространственной структуре населения (пропорциональная зависимость). Но данная связь далеко не всегда линейна, особенно для Арктики, где в экономике ключевую роль играет промышленность (соответственно, и в структуре основных фондов значительную долю имеют фонды промышленности), подотрасли которой в современных условиях технологического развития сильно отличаются между собой по показателям трудоемкости и фондоемкости.

В данной статье авторы предлагают свой вариант методического подхода к прогнозированию ущербов в криолитозоне. Наибольшие ущербы в контексте прогнозируемых геокриологических изменений связаны с жилищным фондом и зданиями и сооружениями отраслей экономики⁶. В муниципальном разрезе, масштаб которого принят оптимальным для данного исследования (возможность сопоставления социально-экономических и природных параметров в едином пространственном масштабе), существуют серьезные ограничения в плане обеспеченности показателями стоимости данных видов основных фондов. Для жилфонда информация отсутствует, доступен лишь показатель “Наличие основных фондов на конец года по полной учетной стоимости по коммерческим и некоммерческим организациям (тыс. руб.)”. Под этим видом фондов, следует понимать фонды организаций муниципальной формы собственности, т.е. муниципальный жилищный фонд и объекты городской инфраструктуры, муниципальные социально значимые объекты недвижимости (детские дошкольные учреждения, школы, библиотеки и пр.). По нашим оценкам, эти фонды составляют для рассматриваемых

муниципальных образований в среднем 2–25% от общей суммы, причем их значение наиболее высоко в наименее экономически развитых дотационных районах.

Поскольку этих данных недостаточно для исчерпывающей оценки ущербов на уровне муниципальных образований, необходимо провести дооценку остальной части основных фондов, исходя из значения их суммарной стоимости в соответствующем регионе по видам экономической деятельности. Региональный показатель “Стоимость основных фондов (на конец года; по полной учетной стоимости; миллионов руб.)” включает в себя здания (жилые и нежилые) и сооружения по всем видам экономической деятельности. К сооружениям относятся такие объекты, как, например, магистрали, автомобильные, железные дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов; мосты, эстакады, тоннели; гидротехнические сооружения; магистральные трубопроводы, линии связи и электропередачи; местные трубопроводы, шахты, скважины, сооружения для отдыха, развлечений и проведения досуга и пр. Приватизированное и выкупленное гражданами жилье, не являющееся основными фондами организаций, в данном показателе не отражается⁷. Необходимо иметь в виду, что конструкции оснований фундаментов части таких сооружений не предполагают использование свай, поэтому наша методика оценки потери несущей способности в этом случае имеет ограничения.

В целом, использование этих двух индикаторов (стоимость жилищного фонда и стоимость зданий и сооружений по видам экономической деятельности) позволяет с максимальной подробностью охватить все наиболее уязвимые к геокриологическим изменениям элементы основных фондов.

Информационной базой данного этапа исследования послужили следующие открытые ресурсы:

1. База данных Росстата “Показатели муниципальных образований”; сборники Росстата “Регионы России. Социально-экономические показатели”, “Российский статистический ежегодник 2019”.

2. Официальный сайт Государственной корпорации – Фонд содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства.

3. Нормативно-правовые документы региональных и муниципальных органов власти “Об утверждении размера средней рыночной стоимости одного квадратного метра общей площади жилья”, официальные сайты администраций муниципальных образований.

⁶ Согласно Общероссийскому классификатору основных фондов (ОКОФ), действующему с 01.01.2017 и утвержденному приказом Росстандарта от 12.12.2014 № 2018-ст.

⁷ Подробнее см. Об утверждении Указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения № 11 “Сведения о наличии и движении основных фондов (средств) и других нефинансовых активов”, приказ Минэкономразвития России № 717 от 29 ноября 2019 г.

4. Сайты агентств недвижимости, открытые базы данных недвижимости (<https://www.domofond.ru/>, <http://www.rlt24.com/>, <https://domclick.ru/>, <https://mnogodetey.ru/regions/> и др.).

В целях оценки стоимости жилфонда на основании вышеизложенных информационных ресурсов была создана база данных в территориальном разрезе муниципальных образований регионов АЗРФ, включающая следующие показатели: адрес жилого дома, год ввода в эксплуатацию, площадь. Всего в базу данных вошли 23.9 тыс. жилых домов общей площадью порядка 44.6 млн м².

Для оценки потенциальных ущербов от таяния многолетней мерзлоты требуется рассчитать рыночную стоимость (использование которой при данной задаче представляется предпочтительным, в отличие от, например, кадастровой, ликвидационной и других видов стоимости) жилищного фонда, расположенного в ареалах потенциального риска. Важным уточняющим коэффициентом при этом является дата ввода жилого дома в эксплуатацию, поскольку более новый фонд в целом более приближен к современным эксплуатационным условиям, параметры которых (допустимые предельные значения температур и пр.) закладывались при проектировании, и в целом новый фонд отличается меньшей степенью изношенности (меньше влияние других факторов, влияющих на деформации). В региональной структуре наиболее «молодой» жилищный фонд характерен для регионов нового ресурсного освоения – Ямало-Ненецкого и Ненецкого АО, (а также в арктических районах Якутии за счет того, что старый жилфонд там плохо отображен в статистике).

Данные о площади многоквартирных домов на официальном сайте Фонда содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства приведены по МО с различной степенью полноты: средний процент раскрытия информации от менее чем 60% до 80% и выше. Это потребовало проведения процедуры дооценки недостающих параметров при расчете стоимости. Средняя рыночная стоимость 1 м² общей площади жилья была получена на основании нормативно-правовых документов региональных и муниципальных органов власти «Об утверждении размера средней рыночной стоимости одного квадратного метра общей площади жилья», с официальных сайтов администраций муниципальных образований, а также при отсутствии данных – посредством анализа сайтов рынка недвижимости. В ряде случаев использовался «Понижающий коэффициент для расчета рыночной стоимости жилья вне областных центров и крупных городов»⁸ для каждого региона.

⁸ Приказ Росстата от 22.08.2012 N 459 «Об утверждении Методологических указаний по расчету текущей рыночной стоимости жилых зданий в соответствии с требованиями Системы национальных счетов».

Внутрирегиональная дифференциация средней рыночной стоимости 1 м² жилья весьма высока, особенно в регионах, полностью не включенных в состав АЗРФ. В связи с этим, насколько позволяли открытые данные, информация о стоимости бралась в максимально возможном для данного исследования крупном масштабе – на уровне сельских и городских поселений.

Дооценка стоимости жилых домов, для которых отсутствует информация о площади (x) проводилась по формуле (3). По генеральной совокупности данных для каждого муниципального образования была рассчитана доля жилых домов, для которых отсутствует информация о площади. Если эта доля превышала 10% (в данном исследовании выбранный уровень обобщения позволяет считать меньшую долю как не превышающую статистическую погрешность), то недостающий процент оценивался посредством вычисления простой пропорции:

$$x = (K \cdot n) / (100 - n), \quad (3)$$

где K – рассчитанная стоимость жилого фонда в МО, по которому есть данные о площади, млн рублей; n – доля жилых домов в МО, по которым данные о площади отсутствуют, %.

В наименее статистически обеспеченных МО (например, в некоторых арктических районах Якутии) полностью отсутствует информация о площади существующего перечня жилых домов, либо их доля превышает 50%. В таком случае оценка их стоимости проводилась по следующему упрощенному алгоритму: показатель общей площади жилых помещений из базы данных показателей муниципальных образований Росстата перемножался со средней рыночной стоимостью 1 м² жилья в соответствующем муниципалитете.

Для оценки стоимости зданий и сооружений принималось допущение, что показатель стоимости основных фондов пропорционален объему валового производства по соответствующему виду экономической деятельности, а объем валового производства в свою очередь пропорционален фонду заработной платы с поправкой на среднеотраслевые коэффициенты, полученные для регионов России. В разрезе муниципальных образований в открытом доступе также отсутствует статистическая информация по объемам валового производства в стоимостном выражении по многим значимым отраслям экономики. Росстатом даны лишь следующие отрасли, формирующие добавленную стоимость: объем промышленного и сельскохозяйственного производства, оборот розничной торговли (т.е. отрасли, по которым напрямую можно оценить стоимость основных фондов на основании прямой пропорции). Необходима дооценка остальных значимых видов экономической деятельности: строитель-

ства, транспорта и связи, операций с недвижимостью, государственного управления, здравоохранения и образования, которую предлагается произвести на основании данных о фонде заработной платы работников организаций по соответствующим отраслям.

Обосновать рациональность такого подхода можно путем подтверждения корреляционных связей данного показателя со статистически доступными параметрами — объемом производства в обрабатывающей промышленности и в производстве и распределении электроэнергии, газа и воды и фондом зарплаты в соответствующих отраслях. Анализ данных по МО регионов, территории которых включены в состав АЗРФ, показал очень высокую степень корреляции этих двух показателей — от 0.7 до 1. При этом, несмотря на очевидную связь двух параметров, соблюдены условия применимости корреляции Пирсона: во-первых, проведена дополнительная проверка с исключением выбросов; во-вторых, проверено наличие нелинейных зависимостей между переменными (анализ диаграмм рассеяния).

Дооценка недостающих параметров произведена следующим образом: региональный показатель оборота организаций⁹ по каждому виду экономической деятельности распределяется по МО пропорционально фонду заработной платы по соответствующей отрасли. Путем суммирования предоставленных Росстатом и рассчитанных показателей получено оценочное значение валового производства для каждого МО рассматриваемых регионов.

Фонды по видам экономической деятельности (согласно ОКВЭД) рассчитаны для каждого МО следующим образом: стоимость фондов по региону распределена пропорционально доле каждого МО в валовом производстве соответствующей отрасли. Основные фонды из категории “Прочие виды” были распределены для каждого МО пропорционально суммарному валовому производству по всем отраслям. Такая оценка достаточно грубая, однако была проведена следующая процедура верификации: Росстатом даются значения стоимости основных фондов по некоторым крупнейшим городам. Таким образом, расчетные значения можно сравнить с фактическими. Например, расчеты по городам регионов, имеющих арктические территории, дали следующие результаты: г. Мурманск — 94% (доля расчетного значения от фактического); г. Красноярск — 101%; г. Петрозаводск — 85%; г. Якутск — 114% и пр.). В связи с

⁹ Оборот организаций — стоимость отгруженных товаров собственного производства, выполненных собственными силами работ и услуг, а также выручка от продажи приобретенных на стороне товаров (без налога на добавленную стоимость, акцизов и других аналогичных обязательных платежей).

этим можно утверждать, что расчетные значения близки к фактическим, и, главное, в целом учтены внутрирегиональные пропорции и дифференциация. Далее, для повышения точности расчетов и снижения погрешности, из общерегионального значения стоимости основных фондов было вычтено значение, данное Росстатом для городов, и уже получившийся остаток распределяется по оставшимся МО. Обычно доля регионального центра и крупнейших городов в основных фондах весьма велика. Например, для регионов АЗРФ доля столиц по этому показателю составляет: Анадырь — 49%, Мурманск — 22%, Красноярск — 25%, Архангельск — 21% и т.д., что существенно снижает погрешность произведенных дооценок.

Важно понимать какую часть в общей стоимости основных фондов составляют здания и сооружения, как наиболее восприимчивая составляющая к деградации ММП. В общей структуре основных фондов (среднероссийское значение) доля зданий и сооружений — 64% (остальное приходится на машины и оборудование, транспортные средства и пр. виды), т.е. среднеотраслевой понижающий коэффициент равен 0.64.

Таким образом выявлены следующие понижающие коэффициенты, на которые были перемножены получившиеся на предыдущем этапе оценки стоимости основных фондов по соответствующим видам экономической деятельности каждого из рассматриваемых МО: сельское хозяйство — 0.46; добыча топливно-энергетических полезных ископаемых — 77.6; добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических — 0.51; рыболовство — 0.1; обрабатывающие производства — 0.42; производство и распределение электроэнергии, газа и воды — 0.61; транспорт и связь — 0.61; туризм — 0.31. Результаты расчета двух ключевых параметров (жилищного фонда и зданий и сооружений по отраслям экономики) представлены в табл. 3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОГО УЩЕРБА ЖИЛИЩНОМУ ФОНДУ, ЗДАНИЯМ И СООРУЖЕНИЯМ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ

Если изменение несущей способности фундамента для выделенного района (муниципального образования) находилось в пределах 15%, ущерб, как отмечалось выше (п. 2.3), считался нулевым. Если же несущая способность фундамента изменялась на 15%, здания и инженерные сооружения считались аварийными, и их стоимость относилась на счет ущерба. Данные о стоимости зданий и инженерных сооружений были получены на основании оценки основных фондов соответствующих районов АЗРФ (см. табл. 3).

Таблица 3. Стоимость зданий и инженерных сооружений в муниципальных образованиях АЗРФ

Муниципальные образования (МО)	Стоимость жилфонда, млн руб.	Стоимость зданий и сооружений по всем видам экономической деятельности, млн руб.
<i>Муниципальный район</i>		
Абыйский	4080	4416.4
Аллаиховский	2851.2	2851.0
Анабарский национальный (Долгано-эвенкийский)	4224.7	14460.4
Анадырский	17404.8	6819.2
Билибинский	18808.3	14684.7
Булунский	3699.0	9573.2
Верхнеколымский	2504.9	9047.4
Верхоянский	3186.8	9047.4
Жиганский	2419.0	2477.5
Заполярный	12866.6	380872.5
Красноселькупский	4184.2	188334.9
Момский	1550.9	1032.0
Надымский	52923.8	1544143.7
Нижнеколымский	1235.9	3426.3
Новая Земля	2076	699.0
Оленекский	5752.7	1275.2
Приуральский	10708.3	23576.7
Пуровский	69709.4	2515727.5
Среднеколымский	1493.4	1814.1
Тазовский	18687.1	685140.8
Таймырский Долгано-Ненецкий	13591.9	63918.6
Туруханский	5899.2	345690.4
Усть-Янский	6342.7	5520.0
Чукотский	4805.3	1541.8
Шурышкарский	8663.1	6770.8
Эвено-Бытантайский национальный	89.3	589.5
Ямальский	11136.67	869169.9
<i>Городской округ</i>		
Воркута	3854.3	273896.4
Анадырь	39153.8	77549.5
Певек	15186.7	11522.3
Провиденский	5630.6	1312.8
Этвекино	10036.82	3979.1
Губкинский	37962.4	68797.2
Лабытнанги	36305.8	126740.4
Муравленко	25644.8	48665.1
Нарьян-Мар	42635.4	177882.6
Новый Уренгой	250203.3	735718.1
Норильск	116646.9	597982.9
Ноябрьск	160857.2	533565.1
Салехард	95403.8	244629.9

Таблица 4. Оценки линейного тренда регионально осредненной температуры приземного воздуха за 1976–2006 гг. и 1976–2012 гг. для физико-географических регионов России и федеральных округов, в среднем за год и по сезонам [1]: b – коэффициент линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет), α_0 – критический уровень значимости

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	b	α_0	b	α_0	b	α_0	b	α_0	b	α_0
Физико-географические регионы России, 1976–2006										
Европейская часть РФ	0.48	1	0.68	15	0.28	18	0.45	1	0.45	7
Западная Сибирь	0.32	5	0.26	59	0.60	6	0.22	23	0.18	59
Средняя Сибирь	0.46	2	0.42	45	0.58	5	0.47	0	0.24	45
Прибайкалье и Забайкалье	0.46	0	0.39	35	0.66	1	0.58	0	0.21	45
Приамурье и Приморье	0.40	0	0.52	10	0.32	12	0.26	3	0.56	0
Восточная Сибирь	0.42	1	–0.23	35	0.73	1	0.44	0	0.85	0
Физико-географические регионы России, 1976–2012										
Европейская часть РФ	0.52	0	0.43	18	0.41	1	0.59	0	0.64	0
Западная Сибирь	0.29	4	–0.09	100	0.68	0	0.19	18	0.45	7
Средняя Сибирь	0.43	0	0.25	56	0.66	0	0.43	0	0.39	14
Прибайкалье и Забайкалье	0.32	1	0.06	100	0.53	1	0.52	0	0.26	14
Приамурье и Приморье	0.39	0	0.44	6	0.28	9	0.36	0	0.53	0
Восточная Сибирь	0.50	0	–0.04	100	0.74	0	0.46	0	0.80	0
Федеральные округа РФ, 1976–2012										
Северо-Западный	0.51	0	0.58	18	0.41	4	0.48	0	0.59	1
Центральный	0.59	0	0.53	14	0.44	2	0.75	0	0.64	0
Приволжский	0.50	0	0.29	40	0.46	3	0.55	1	0.74	0
Южный	0.54	0	0.37	18	0.37	6	0.78	0	0.65	0
Северо-Кавказский	0.40	0	0.27	18	0.25	7	0.54	0	0.53	1
Уральский	0.36	4	0.11	100	0.64	1	0.25	14	0.48	9
Сибирский	0.30	2	–0.02	100	0.66	0	0.34	0	0.31	18
Дальневосточный	0.48	0	0.20	24	0.58	0	0.46	0	0.67	0

Примечание: Жирным шрифтом выделены коэффициенты тренда, значимые на 5%-м уровне; курсивом – те из них, которые статистически значимы уже на 1%-м уровне.

Оценка изменения возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных районах (муниципальных образованиях) АЗРФ выполнялась, как указывалось ранее, на основе сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (п. 2.1). Все три сценария учитывались и выбирались максимальная и минимальная оценки. В других, альтернативных, расчетах использовались тренды изменения температур воздуха за последние десятилетия. В частности, принимались в расчет тренды изменения температур воздуха (табл. 4) по [1].

Результаты расчетов сведены в табл. 5. Расчет с учетом снега и растительности и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 показал, что изменения прочности смерзания грунтов с материалом фундамента во всех случаях и во всех возможных диапазонах свойств мерзлых и талых грунтов превышают 15%. Таким образом, в этом

случае устойчивость грунтов не обеспечивается (вариант 1). Если использовать тренды температур воздуха из табл. 4, изменения также не обеспечивают несущую способность (вариант 2).

Если рассчитывать температуры грунтов и, соответственно, прочность смерзания грунтов с материалом фундамента без учета влияния снега и растительности по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, что характерно для территорий застройки и проветриваемых подполий зданий (вариант 3), то изменения продолжают оставаться максимальными (см. табл. 5). Если же при этом используются тренды температур воздуха из табл. 4, при благоприятном сочетании грунтовых условий ущерб сокращается почти на порядок (вариант 4).

В свое время были определены тренды изменения температур воздуха и грунтов, и найдены коэффициенты соответствия между ними для различных регионов (табл. 6). Таким образом, зная

Таблица 5. Расчет ущерба применительно к зданиям и сооружениям по всем видам экономической деятельности при различных сценариях

Варианты	Ущерб, млн руб.		Описание
	min	max	
1	Максимальный (9614862.25)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. для естественных условий
2	Максимальный (9614862.25)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха [1] для естественных условий
3	Максимальный (9614862.25)		По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий) по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
4	979704.55	8080641.21	По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий), с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха [1]
5	3999389.33	9614862.25	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
6	Менее 50 млрд руб.	8417438.29	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
7	6251189.56	9606920.00	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
8	Менее 50 млрд руб.	7578109.49	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
9	9543263.80	9614862.25	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C до 3°C по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
10	Менее 50 млрд руб.	2145121.54	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C до 3°C по сравнению с температурой воздуха, для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 (для нарушенных условий)
11	345690.41	9614862.25	По СП 25.13330.2012 [6] для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
12	49707.27	9606491.11	По СП 25.13330.2012 [6] для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 [1] (для нарушенных условий)

Таблица 6. Линейные тренды ($\alpha_{ТВ}$ и $\alpha_{ТП}$) среднегодовых значений температуры воздуха и пород (соответственно $T_{В}$ и $T_{П}$) за 1965–2010 гг. на Севере России (Павлов, 2008; Методы оценки..., 2012, раздел 8, с дополнениями Г.В. Малковой) из [1]

Регион	Число пунктов наблюдения	Тренды $T_{В}$ и $T_{П}$, °C/год		$K\alpha = \alpha_{ТВ}/\alpha_{ТП}$
		$\alpha_{ТВ}$	$\alpha_{ТП}$	
Север Европейской части России	6	0.033	0.024	0.72
Север Западной Сибири	6	0.044	0.031	0.70
Средняя Сибирь	7	0.045	0.025	0.56
Якутия	10	0.046	0.033	0.72
Юг Сибири	4	0.045	0.022	0.49
Прибайкалье, Забайкалье	3	0.042	0.034	0.81
Северо-Восток России	5	0.036	0.024	0.67
Север России в целом	41	0.042	0.028	0.66

Таблица 7. Расчеты ущерба по жилому фонду МО АЗРФ при различных сценариях

Варианты	Ущерб, млн руб.		Описание
	min	max	
1	Максимальный (1130 417.11)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 для естественных условий
2	Максимальный (1130 417.11)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха [1] для естественных условий
3	Максимальный (1130 417.11)		По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий) по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
4	103820.21	856629.81	По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий), с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха [1]
5	801081.49	113017.11	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов, и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
6	Менее 50 млрд руб.	672214.30	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
7	870101.90	1127619.60	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов, и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
8	Менее 10 млрд руб.	665440.66	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов, с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
9	1078775.15	1130417.11	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2 до 3°C по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
10	Менее 10 млрд руб.	259379.37	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2 до 3°C по сравнению с температурой воздуха, для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 (для нарушенных условий)
11	18765.72	1127155.03	По СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
12	18765.72	1119204.68	По СП 25.13330.2012 для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 (для нарушенных условий)

будущие температуры воздуха, можно прогнозировать (строго говоря, для естественных условий) будущие температуры грунтов. Исходные температуры грунтов для настоящего времени для регионов могут быть либо взяты с Геокриологической карты СССР (1991)¹⁰, либо из литературных [2] или фондовых источников.

Такой расчет был сделан сначала для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (вариант 5), а затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 [1] при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 6) с исходными температурами грунтов с Геокриологической карты СССР (1991), а также с исходными температурами грунтов по литературным и фондовым источникам (соответственно, варианты 7 и 8).

¹⁰URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_26860

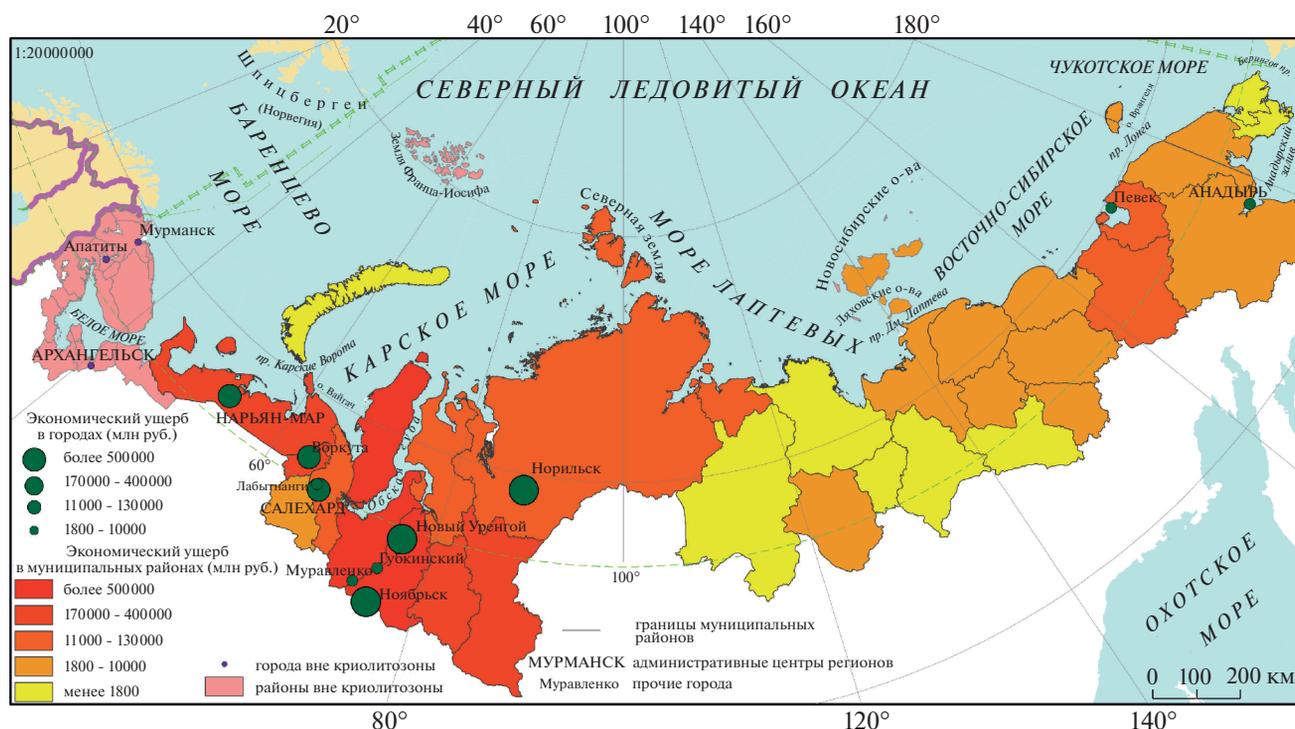


Рис. 2. Экономический ущерб в муниципальных районах и городах АЗРФ.

Как отмечалось, среднегодовая температура воздуха в подполье зданий выше, чем снаружи, на $1-3^{\circ}\text{C}$ в г. Норильске и на $0.2-1^{\circ}\text{C}$ в г. Якутске [2]. При этом на поверхности грунта под зданиями формируется среднегодовая температура, близкая к среднегодовой температуре воздуха в подполье. Поэтому возникает возможный вариант расчета, при условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C (наихудшие условия) до 3°C (наилучшие условия) по сравнению с температурой воздуха. Поэтому были проведены расчеты для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (вариант 9) и затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 [1] при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 10) с учетом этих особенностей формирования температурного режима в подполье зданий.

Наконец, в табл. 5 приводятся результаты расчета изменения температурного режима грунтов по СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (вариант 11) и затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 12).

При осреднении данных получается значение 6421627.54 млн руб. для всех сценариев.

В табл. 7 представлены результаты расчета ущерба при учете только жилого фонда МО АЗРФ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важно отметить, что в настоящее время нельзя считать приоритетным какой-либо из этих вариантов. Вероятно, что варианты для нарушенных условий в большей степени отражают условия на застроенных территориях. Значительный диапазон оценок возможного ущерба в табл. 5 и 7 не является основанием для выбора крайних (максимального или минимального) вариантов. И максимальный, и минимальный варианты получены для крайних значений теплофизических характеристик грунтов, и в действительности, ввиду разнообразия природных условий на застроенных или нарушенных территориях, объективной оценкой будут являться скорее промежуточные значения возможного ущерба. Следует подчеркнуть, что в данной работе использовалась только зависимость изменения сопотривления сдвигу грунтов по поверхности смерзания от температуры, и не во всех случаях только эта характеристика определяет устойчивость зданий и инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах.

В целом, по-видимому, можно предполагать ущерб для зданий или инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 5–7 трлн руб. или больше (рис. 2). В целом это согласуется с предыдущими оценками, несколько отличаясь в ту или иную сторону в целом [11, 10, 17], хотя мы рассматривали только несущую способность фундаментов жилых и промышленных зданий, и заметно выше, чем результаты работы [16].

Ущерб жилому фонду (см. табл. 7) ожидается примерно, как и стоимость основных жилых фондов, на порядок меньше, около 700 млрд руб. к середине столетия.

Следует иметь в виду, что деформации и разрушения зданий и инженерных сооружений в АЗРФ будут развиваться постепенно, и, вероятно, несколько отставать от изменений температурного режима грунтов.

В данной работе рассматривалась только АЗРФ. Большие территории криолитозоны, где изменения температур грунтов также будут происходить и сопровождаться, возможно, еще большими деформациями и разрушениями, например, Забайкалье (г. Чита), Центральная Якутия (г. Якутск, Мирный), Магаданская область (г. Магадан) и др., также следует рассматривать, как территории, где в будущем можно ожидать крупный ущерб, и включить их в систему будущего мониторинга криолитозоны.

Некоторые (возможно, немалые) поправки к прогнозным расчетам могут иметь место в связи с особенностями цикличности потеплений-похолоданий климата в XXI в., как это было и в прошлом столетии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев и др.; М.: Росгидромет, 2014. 1007 с. ISBN 978-5-9631-0322-7.
2. *Геокриология СССР*. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989.
3. Климатический центр Росгидромета “Изменение климата России в 21-м веке” URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>
4. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Кол. авт. В.А. Кудрявцев, В.Г. Меламед, Л.С. Гарагуля и др. / Под ред. А.В. Брушкова, Л.С. Гарагули. М.: МГУ, 2016.
5. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 12. С. 1228–1239.
6. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 2012. <http://docs.cntd.ru/document/1200095519>
7. *Badina S.V.* Prediction of socioeconomic risks in the cryolithic zone of the Russian Arctic in the context of upcoming climate changes // *Studies on Russian Economic Development*. 2020. V. 31. №. 4. P. 396-403.
8. *Burke, M., Hsiang S.M., Miguel E.* Global non-linear effect of temperature on economic production // *Nature*. 2015. 527: 235.
9. *Euskirchen, E., Goodstein E., Huntington, H.* An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere // *Ecological Applications*. 2013. 23: 1869-1880.
10. *Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al.* Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nature communications*. 2018. V. 9 (1). 5147. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
11. *Hope, C., Schaefer, K.* Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2016. V. 6. № 1. P. 56–59. <https://doi.org/10.1038/nclimate2807>
12. IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Fifth Assessment Report. Geneva: 2014.
13. *Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., et al.* Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation // *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2017. 114(2): E122–E131.
14. *Shiklomanov N., Streletskiy D., Suter L.* Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // *Polar Geography*. 2019. № 42. P. 267–286.
15. *Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E.* Permafrost, infrastructure and climate change: a GISbased landscape approach to geotechnical modeling // *Arctic, Antarctic, Alpine Res.* 2012. V. 44. P. 368–380.
16. *Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O.* Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. № 025003. P. 1–15.
17. *Yumashev, D., Hope, C., Schaefer, K. et al.* Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nat Commun* 10, 1900 (2019).

DAMAGE ASSESSMENT FOR RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL BUILDINGS AND STRUCTURES DUE TO TEMPERATURES CHANGE AND PERMAFROST THAWING IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION BY THE MIDDLE OF THE XXI CENTURY

V. P. Melnikov^{a,b,#}, V. I. Osipov^{c,##}, A. V. Brouchkov^{d,###}, S.V. Badina^{e,f,####}, D. S. Drozdov^a, V. A. Dubrovin^{g,#####}, M. N. Zheleznyak^{h,#####}, M. R. Sadurtdinov^a, D. O. Sergeev^{c,#####}, N. A. Ostarkov^{i,#####}, A. A. Falaleeva^d, and Y. Yu. Shelkov^d

^a Institute of the Earth's Cryosphere TyumSC SB RAS, ul. Malugina, 86, Tyumen, 625026 Russia

^b ANO "Provincial Academy", ul. Malugina, 86, Tyumen, 625026 Russia

^c Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

^d Geology Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^e Institute of Economic Forecasting RAS, Nakhimovskii pr., 47, Moscow, 117418 Russia

^f Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny per., 36, Moscow, 117997 Russia

^g Gidropetsgeologiya, ul. Marshala Rybalko, 4, Moscow, 123060 Russia

^h Melnikov Permafrost Institute RAS, ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010 Russia

ⁱ FASI "Vostokgosplan", ul. Lev Tolstoy, 8, Khabarovsk, 119121 Russia

[#] E-mail: sciensec@ikz.ru

^{##} E-mail: osipov@geoenv.ru

^{###} E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

^{####} E-mail: bad412@yandex.ru

^{#####} E-mail: info@specgeo.r

^{#####} E-mail: fe@mpi.ysn.ru

^{#####} E-mail: sergeevdo@mail.ru

^{#####} E-mail: n.ostarkov@vostokgosplan.ru

An attempt was made to assess the possible damage from the loss of the bearing capacity of the foundations of buildings and structures for various warming scenarios in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) by 2050. The assessment was done separately for 39 municipalities of the AZRF, where permafrost is spread. The change in the average annual ground temperatures was evaluated on the basis of forecast data from the Climatic Center of Rosgidromet and scenarios of climate change RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, air and ground temperatures changes trends and actual data on temperatures in the building bases. The mean annual temperature of grounds (MATG) differs from the mean annual air temperature (MAAT) by the value of the shift, which consists in the influence of radiation correction, snow, vegetation, ground shift and the influence of atmospheric precipitation. The total temperature shift was estimated in two ways, i.e., calculated taking into account the possible changes in parameters due to climate change and according to data on the total slide observed in the areas of the AZRF. Calculations were carried out by the Kudriavtsev method and according to the Construction Rules 25.13330.2012 for possible range of ground properties, all scenarios were taken into account as options, and maximum and minimum damage was calculated. It was assumed that most of buildings and engineering structures were built with the preservation of permafrost, piles being the most common foundation type. The change in their bearing capacity was estimated, and if the safety threshold was exceeded according to the Construction Rules 25.13330.2012, buildings were considered as damaged. Buildings and engineering structures statistics was obtained mostly from the open sources on the base of the authors' method. Damage for buildings and engineering structures in the AZRF by the middle of the century is evaluated in range of about 5–7 trillion rubles, which is consistent in general with other estimates. Damage for housing is expected to be about 700 billion rubles.

Keywords: damage assessment, Arctic zone of the Russian Federation, permafrost, temperature changes, thawing, residential and industrial buildings, bearing capacity of frozen ground

REFERENCES

1. Alekseev, G.V. et al. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na teritorii Rossiiskoi Federatsii* [The second Rosgidromet assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation]. Rosgidromet, 2014. URL: http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_ob_eng.pdf (in Russian)
2. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* [Geocryology of the USSR. Western Siberia], Ershov, E.D., Ed., Moscow, Nedra, 1989. (in Russian)
3. *Klimaticheskii tsentr Rosgidrometa. "Izmenenie klimata Rossii v 21m veke"* [Roshydromet Climate Center,

- “Russian Climate Change in the 21st Century”]. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke> (in Russian)
4. Kudryavtsev, V.A., Melamed, V.G., Garagulya, L.S. et al. *Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh* [The basics of the permafrost forecast in engineering and geological research]. Brouchkov, A.V., Garagulya, L.S., Eds., Moscow, MGU Publ., 2016. (in Russian)
 5. Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O., Streletskiy, D.A. *Ekonomicheskaya otsenka posledstviy degradatsii vechnoi merzloty pod vliyaniem izmenenii klimata dlya ustoychivosti dorozhnoi infrastruktury v Rossiiskoi Arktike* [Economic assessment of the effects of permafrost degradation under the influence of climate change on the sustainability of road infrastructure in the Russian Arctic]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2019, vol. 89, no. 12, pp. 1228–1239. (in Russian)
 6. SP 25.13330.2012. *Osnovaniya i undamenty na vechno-merzlykh gruntakh* [Construction Rules of Russian Federation. SP 25.13330.2012 Foundations and foundations on permafrost ground]. Moscow, 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095519> (in Russian)
 7. Badina, S.V. Prediction of socioeconomic risks in the cryolithic zone of the Russian Arctic in the context of upcoming climate changes. *Studies on Russian Economic Development*. 2020, vol. 31, no. 4, pp. 396–403.
 8. Burke, M., Hsiang S.M., Miguel, E. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 2015, no. 527, p. 235.
 9. Euskirchen, E., Goodstein, E., Huntington, H. An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere. *Ecological Applications*, 2013, no. 23, pp. 1869–1880.
 10. Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature communications*, 2018, vol. 9(1), p. 5147. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
 11. Hope, C., Schaefer, K. Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. *Nature Climate Change*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 56–59. DOI: 10.1038/nclimate2807
 12. IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Fifth Assessment Report. Geneva, 2014.
 13. Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., et al. Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2017, no. 114, pp. E122–E131.
 14. Shiklomanov, N., Streletskiy, D., Suter, L. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019, no. 42, pp. 267–286.
 15. Streletskiy, D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling. *Arctic, Antarctic, Alpine Res.* 2012, vol. 44, pp. 368–380.
 16. Streletskiy, D.A., Suter, L., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, no. 025003, pp. 1–15.
 17. Yumashev, D., Hope, C., Schaefer, K. et al. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nat. Commun.* 2019, no. 10, p. 1900.