

## ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В ОТНОШЕНИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

**А. Н. Якубович**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия  
e-mail: 54081@mail.ru

**И. А. Якубович**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия  
e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

**Аннотация.** *Предмет.* Инфраструктура транспортных систем криолитозоны России, эксплуатируемая в условиях глобального потепления климата.

**Цели.** Количество оценить риски нарушения функциональности объектов транспортной инфраструктуры с учетом грунтовых и природно-климатических особенностей на территории их эксплуатации.

**Методология.** Моделирование температурной динамики грунтового массива, включающего в себя верхний сезонно-тальй слой и нижний слой вечномерзлого грунта, выявление изменения его прочностных и деформационных свойств при принятом сценарии климатических изменений, оценка влияния изменений в грунтовом массиве на эксплуатационное состояние и безопасность различных видов инфраструктурных объектов транспортных систем (с учетом появления дополнительных осадков оттаивающего грунта и снижения его несущей способности), определение величин прогнозируемых рисков по шкале, единой для всех видов объектов.

**Результаты.** Получены новые данные о негативных последствиях климатических изменений для инфраструктуры транспортных систем криолитозоны России. При достаточно консервативных предположениях о потеплении на 2 градуса по Цельсию риск нарушения функциональности для автодорожного профиля прогнозируется на уровне от 86 до 294 баллов по 1000-балльной шкале, причем с повышением температуры вечномерзлого грунта климатические риски возрастают. Величина ожидаемых рисков в отношении аэродромного покрытия находится примерно на том же уровне; эти два вида объектов отличаются наибольшей устойчивостью к климатическим изменениям. Свайные фундаменты подвержены риску, оцениваемому от 143 до 529 баллов. Наиболее уязвимы к потеплению ленточные и столбчатые фундаменты, для которых наименьшая полученная при моделировании величина риска равна 389 баллам, а при неблагоприятных условиях (высокотемпературная вечная мерзлота в сочетании с низкой влажностью грунта) риск возрастает до максимально возможного значения – 1000 баллов.

**Выводы.** Риски нарушения функциональности инфраструктурных объектов транспортных систем криолитозоны, прогнозируемые при потеплении до 2 градусов по Цельсию, следует считать значительными. При рисках до 400 баллов (автодорожный профиль, аэродромное покрытие) целесообразно ограничиться мониторингом текущего состояния объекта и при необходимости восстанавливать его функциональность. При рисках от 400 до 600 баллов рекомендуется, а в случае рисков более 600 баллов является обязательным, проведение превентивных инженерно-технических мероприятий, направленных на стабилизацию температурного режима грунтов и недопущение внезапной утраты функциональности отдельных элементов транспортной системы.

**Ключевые слова:** транспортная система, инфраструктурный объект, криолитозона, изменение климата, моделирование.

**Для цитирования:** Якубович А. Н., Якубович И. А. Оценка климатических рисков в отношении транспортной инфраструктуры северных регионов России // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 2. – С. 96–104. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-96.

## ASSESSMENT OF CLIMATIC RISKS IN RELATION TO THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF THE NORTHERN REGIONS OF RUSSIA

**A. N. Yakubovich**

Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI), Moscow, Russia  
e-mail: 54081@mail.ru

## I. A. Yakubovich

Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI), Moscow, Russia  
e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

**Abstract. Theme.** Infrastructure of transport systems of the permafrost zone of Russia, operated in conditions of global warming.

**Objectives.** To quantify the risks of disrupting the functionality of transport infrastructure facilities, taking into account the soil and natural and climatic features in the territory of their operation.

**Methodology.** Modeling the temperature dynamics of the soil massif, including the upper seasonal thawed layer and the lower layer of permafrost soil, identifying changes in its strength and deformation properties under the accepted scenario of climatic changes, assessing the impact of changes in the soil massif on the operational state and safety of various types of infrastructure facilities of transport systems (taking into account the appearance of additional precipitation of thawing soil and a decrease in its bearing capacity), determination of the values of predicted risks on a scale that is uniform for all types of objects.

**Results.** New data have been obtained on the negative consequences of climate change for the infrastructure of transport systems in the permafrost zone of Russia. Under fairly conservative assumptions about a warming of 2 degrees Celsius, the risk of functional impairment for the road profile is predicted to be from 86 to 294 points on a 1000-point scale, and climatic risks increase with an increase in the temperature of permafrost. The magnitude of the expected risks in relation to the aerodrome pavement is approximately at the same level; these two types of objects are distinguished by the greatest resistance to climatic changes. Pile foundations are subject to risk ranging from 143 to 529 points. The most vulnerable to warming are strip and columnar foundations, for which the lowest risk value obtained during modeling is 389 points, and under unfavorable conditions (high-temperature permafrost in combination with low soil moisture), the risk increases to the maximum possible value of 1000 points.

**Implications.** The risks of disrupting the functionality of infrastructural objects of the permafrost transport systems, predicted at warming up to 2 degrees Celsius, should be considered significant. With risks up to 400 points (road profile, airfield coverage), it is advisable to limit ourselves to monitoring the current state of the facility and, if necessary, restore its functionality. With risks from 400 to 600 points, it is recommended, and in case of risks over 600 points, it is mandatory to carry out preventive engineering and technical measures aimed at stabilizing the temperature regime of soils and preventing a sudden loss of functionality of individual elements of the transport system.

**Key words:** transport system, infrastructure facility, permafrost, climate change, modeling.

**Cite as:** Yakubovich, A. N., Yakubovich, I. A. (2021) [Assessment of climatic risks in relation to the transport infrastructure of the northern regions of Russia]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 96–104. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-2-96.

## Введение

Транспортная система является одним из важнейших элементов, обуславливающих темпы социально-экономического развития северных регионов России. В условиях значительной отдаленности этих регионов от основных социально-экономических центров страны именно транспортная система обеспечивает связность территорий России и создает единое пространство для перемещения людей и грузов [5]. Систематическое освоение сосредоточенных в арктической зоне месторождений полезных ископаемых, добыча которых формирует значительную часть российской экономики, закономерно сопряжено с развитием транспортной инфраструктуры; надежность и бесперебойность ее функционирования является обязательным условием устойчивого развития арктических территорий [1, 6].

Одним из основных факторов, повышающих уязвимость транспортных систем северных регионов России, являются агрессивные эксплуатационные условия [2]. Природно-климатические параметры окружающей среды (в частности, температура воздуха) оказывают очевидное влияние на транс-

портные процессы [11]; при оценке влияния эксплуатационных условий на функциональность автотранспортных систем необходимо принимать во внимание долгосрочную динамику климатических изменений на определенной территории. В целом, хотя потепление климата приводит как к дополнительным проблемам, так и к появлению новых возможностей при организации транспортного сообщения [8], наиболее масштабным процессом на территории Российской Арктики является деградация вечномерзлого грунта. Средние темпы оттаивания вечной мерзлоты, по данным многолетних измерений [12], составляют около 3 см в год, но непосредственно под автомобильными дорогами темпы оттаивания возрастают до 11–13 см в год. Кроме того, климатические изменения в Арктике уже на протяжении нескольких десятилетий идут в 2–3 раза быстрее, чем на остальных территориях Земли [13]. Это уже вызывает насущную необходимость уточнения методов районирования территорий с наличием вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов [4].

Главной проблемой в отношении транспортной инфраструктуры, возникающей вследствие уско-

ренной деградации вечной мерзлоты, является снижение несущей способности грунтов в основании инфраструктурных объектов [7], что приводит к возможности полного или частичного разрушения дорожной сети с соответствующим снижением пропускной способности ее отдельных фрагментов [15]. Прогнозирование негативного влияния климатических изменений на транспортные системы должно осуществляться в рамках общей цифровой парадигмы их развития [3], на основе вероятностных моделей [10], учитывающих, в том числе, неопределенности в предстоящих изменениях климатических параметров. Оценка рисков должна осуществляться с учетом природно-климатических особенностей отдельных территорий [9]. В дальнейшем климатические риски должны быть интегрированы в единую систему управления рисками [14] в целях повышения надежности функционирования транспортных систем северных регионов России.

### Методика исследования

Главным расчетным фактором, обуславливающим величину климатического риска, является снижение несущей способности основания под рассматриваемым объектом, происходящее в результате изменения температурных, а значит и прочностных свойств вечномерзлого грунта. Соответственно, первым этапом при количественной оценке риска является фиксирование климатических параметров, соответствующих проектным условиям эксплуатации (базовый климат  $C_0$ ) и выбор наиболее вероятного сценария климатических изменений, приводящих к измененному климату  $C_1$ . Базовый климат формально описывается как матрица, столбцы которой соответствуют последовательным интервалам времени на протяжении одного года (в дальнейшем называемого среднестатистическим), а строки соответствуют используемым в дальнейших расчетах климатическим параметрам. В настоящей работе использовались 2 параметра состояния климата:

$$C_0 = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_n \\ v_1 & v_2 & \dots & v_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$t$  – температура воздуха в приземном слое,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $v$  – скорость ветра на уровне земли, м/с;  
 $n$  – количество интервалов, на которые разбивался среднестатистический год.

Параметры, описывающие базовый год, определяются на основе статистических данных, полученных по результатам многолетних инструментальных наблюдений за климатом на определенной территории. Измененный климат  $C_1$  формируется

в соответствии с принятым сценарием, внесением смещений в величины  $t$  и  $v$ .

На втором этапе численного расчета климатического риска выполняется моделирование температурной динамики грунта  $D$ , выступающего в качестве основания объекта автотранспортной инфраструктуры. Массив грунта включает в себя как верхний сезонно-тальный слой, так и расположенный под ним слой вечной мерзлоты. При моделировании учитывается конвективный теплообмен между верхним слоем грунта и окружающим воздухом, а также теплообмен в пределах рассматриваемого грунтового массива. Моделирование теплопереноса может быть представлено в виде:

$$D = \mathbf{H}(C, G, M), \quad (2)$$

где

$\mathbf{H}$  – обобщенный оператор, описывающий теплоперенос в рассматриваемой области;

$C$  – климат;

$G$  – физико-механические, теплофизические и геометрические параметры грунтового массива;

$M$  – параметры моделирования (количество интервалов  $n$ , количество точек  $m$  и т. д.). В результате температурная динамика грунта  $D$  принимает форму структуры:

$$D = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ y_1 & y_2 & \dots & y_m \\ d_1 & d_2 & \dots & d_m \end{pmatrix}, \quad d_i = (t_{g,1} \quad t_{g,2} \quad \dots \quad t_{g,n}), \quad (3)$$

где

$x$  и  $y$  – координаты точки в границах грунтового массива;  $m$  – количество точек;

$d$  – множество значений температуры грунта  $t_g$  на протяжении расчетного года.

Моделирование теплопереноса выполняется дважды: для базового и измененного климата; итогами второго этапа численного расчета являются  $D_0$  и  $D_1$ . На третьем этапе производится анализ состояния объекта в течение как базового года, так и года при наступлении климатических изменений, и выявляется максимальное за год значение критериального показателя  $K$ :

$$K = S(D_0, D_1), \quad (4)$$

где

$K$  – критериальный показатель, зависящий от вида объекта;

$S$  – процедура, позволяющая количественно оценить  $K$  с учетом климатических изменений.

Для автодорожного профиля и аэродромного покрытия критериальным показателем является величина осадки грунта, возникающая из-за дополнительного (неучтенного при проектировании) от-

таивания вечной мерзлоты в новых климатических условиях и проявляющаяся на поверхности объекта многочисленными хаотически расположеными дефектами. Для объектов с ленточными фундаментами критериальным показателем служит снижение несущей способности грунта под подошвой фундамента, возникающее вследствие повышения температуры вечной мерзлоты. Свайные фундаменты характеризуются критериальным показателем, отражающим снижение несущей способности сваи в грунтовом массиве с температурной динамикой  $D_1$ .

Поскольку физический смысл и диапазоны возможных значений  $K$  для объектов разных видов неодинаковы, на четвертом этапе вычислительного процесса выполняется приведение критериального показателя к единой шкале климатических рисков:

$$R = F(i, K_{\max}, K), \quad (5)$$

где

$R$  – величина климатического риска в диапазоне от 0 до 1000;

$F$  – процедура вычисления  $R$ ;

$i$  – определяет вид объекта;

$K_{\max}$  – значение критериального показателя, соответствующее максимально возможному риску  $R = 1000$ .

Значение  $K_{\max}$  для автодорожного профиля и аэ-

родромного покрытия принималось равным 10 см. Для фундаментов  $K_{\max}$  принимался как определенный процент от несущей способности основания в условиях базового климата. В случае ленточного фундамента  $K_{\max} = 30\%$ , что соответствует используемому при проектировании таких фундаментов коэффициенту запаса 1,3. В случае свайного основания принималось  $K_{\max} = 40\%$  – в соответствии с коэффициентом запаса свайных фундаментов 1,4. Таким образом, величина риска  $R$  показывает, в какой степени будет исчерпан запас несущей способности основания объекта в новых климатических условиях; риск  $R = 1000$  означает, что этот запас исчерпан полностью. При этом значение  $R = 1000$  не должно интерпретироваться как немедленное разрушение объекта, но его эксплуатация становится безусловно недопустимой.

### Результаты прогнозирования климатических рисков

Моделирование негативного влияния климатических изменений на транспортную инфраструктуру производилось с учетом особенностей состояния вечномерзлых грунтов на отдельных территориях криолитозоны. Было рассмотрено 3 территориальные зоны и 14 пунктов, для которых имелись многолетние данные инструментальных наблюдений за климатом (табл. 1).

Таблица 1. Территориальные пункты в зонах вечной мерзлоты

Территориальные зоны		Пункты			
		Название	Обозначение	Координаты, градусов	
Номер	Характеристика			B	L
1	Низкотемпературная, преимущественно сплошная вечная мерзлота	Депутатский	DPT	69,31	139,98
		Саханджа	SHN	69,77	128,19
		Саскылах	SSK	71,96	114,09
		Среднеколымск	SRK	67,46	153,70
		Ессей	ESS	68,47	102,19
2	Прерывистая и массивно-островная вечная мерзлота	Ныда	NDA	66,63	72,93
		Уренгой	URN	65,97	78,37
		Тазовское	TZV	67,47	78,72
		Тура	TUR	64,28	100,22
3	Вечная мерзлота островного и редкоостровного характера с близкими к 0 °C температурами затухания сезонных колебаний	Петрунь	PTR	66,33	61,21
		Казым	KAZ	63,70	67,24
		Келлог	KLG	62,48	86,30
		Саранпауль	SRN	64,26	60,91
		Толька	TLK	63,41	80,11

Источник: разработано авторами

Возможные типы грунта в основаниях транспортных инфраструктурных объектов криолитозо-

ны, а также их основные физические характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики грунтов в основании инфраструктурных объектов

№ п/п	Модель	Тип грунта	Суммарная влажность $W_{tot}$ , %	Влажность между ледяными включениями $W_m$ , %	Суммарная льдистость $i_{tot}$ , %	Плотность сухого грунта $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	G120	Песок	20	10	2	1800
2	G135	Супесь	35	17,5	3,5	1900
3	G430	Суглинок	30	15	3	1950
4	G450	Глина	50	25	5	2000

Источник: разработано авторами

Численные результаты моделирования климатических рисков для объектов, расположенных в зоне сплошной низкотемпературной вечной мерзлоты, показаны на рис. 1. Рассматривался климатический сценарий, при котором температура воздуха во все

периоды года повышается на одну и ту же величину, равную +2 °С. Для каждого пункта, обозначенного в табл. 1, выполнялось моделирование при 4 возможных типах грунта (характеристики климата во всех 4 вариантах расчета были одинаковы).

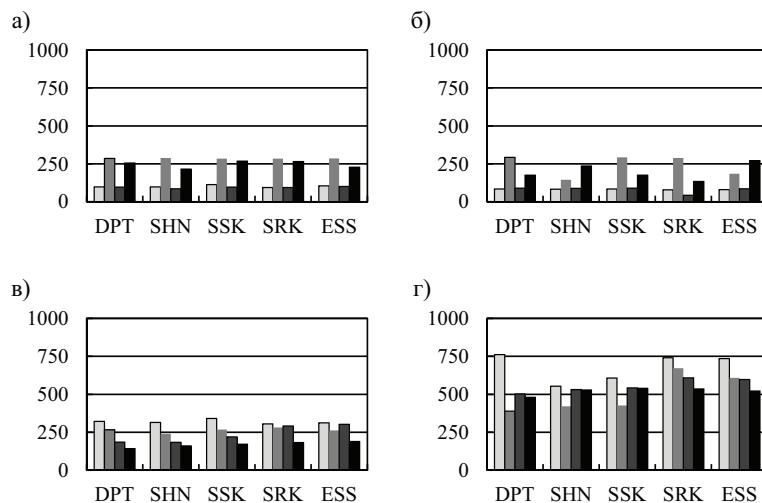


Рис. 1. Климатические риски для объектов 1 территориальной зоны при потеплении на +2 °С: а) – автодорожный профиль, б) – аэродромное покрытие, в) – свайный фундамент, г) – ленточный фундамент; обозначения территориальных пунктов см. табл. 1; на каждом графике четыре значения слева направо соответствуют возможным типам грунта (табл. 2)

Источник: разработано авторами

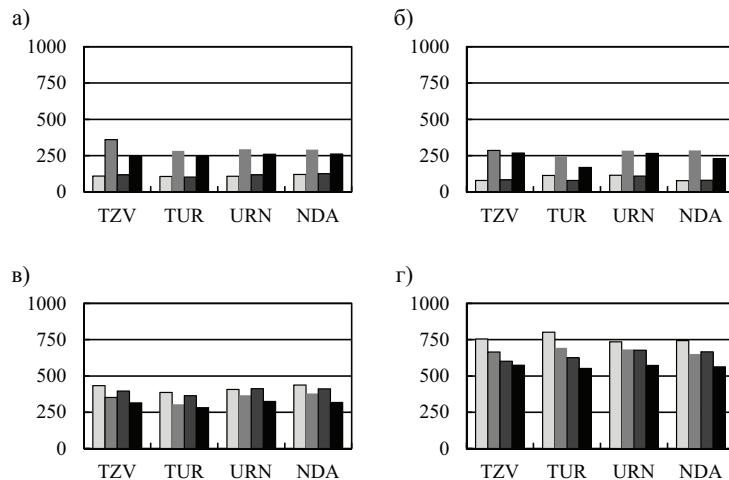


Рис. 2. Климатические риски для объектов 2 территориальной зоны (обозначения см. рис. 1)

Источник: разработано авторами

Прогнозные климатические риски для объектов в зоне прерывистой и массивно-островной вечной мерзлоты показаны на рис. 2, климатический сценарий был принят таким же, как и для рис. 1.

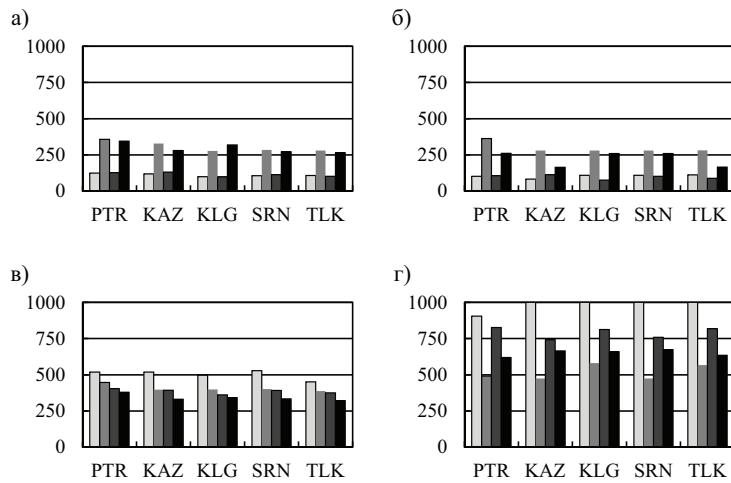


Рис. 3. Климатические риски для объектов 3 территориальной зоны (обозначения см. рис. 1)  
Источник: разработано авторами

Величина климатического риска для различных видов инфраструктурных объектов, показанная на рис. 1–3, вычислялась по соответствующим зависимостям, с приведением итоговых значений риска к единому диапазону от 0 (риск отсутствует) до 1000 (риск максимальен).

#### Обсуждение результатов

В пределах первой территориальной зоны с низкотемпературной мерзлотой для автодорожного профиля риски при грунтах низкой влажности (модели G120 и G430 – табл. 2) лежат в диапазоне  $86 \leq R \leq 114$ , что позволяет считать их в целом незначительными. С повышением влажности грунта риски несколько возрастают (для моделей G135 и G450 риск  $216 \leq R \leq 289$ ), но остаются низкими. Аналогичными оценками риска характеризуется и аэродромное покрытие ( $43 \leq R \leq 91$  при низкой влажности грунта и  $135 \leq R \leq 293$  – при высокой). Свайное основание отличается небольшим снижением риска при повышении влажности грунта ( $185 \leq R \leq 341$  при низкой влажности, что в отдельных случаях повышает климатические риски до среднего уровня, и  $143 \leq R \leq 282$  при высокой влажности, где риск остается на низком уровне). Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям являются ленточные или столбчатые фундаменты, для которых минимальное значение риска составляет  $R = 389$ , а максимальное  $R = 761$ ; из 20 значений риска в этой территориальной группе 13 соответствуют среднему, а 7 – высокому уровню риска.

Территориальная зона с прерывистой и массивно-островной вечной мерзлотой характеризует-

Результаты моделирования рисков при потеплении на  $+2^{\circ}\text{C}$  для объектов 3 территориальной зоны (табл. 1) приведены на рис. 3.

ся небольшим возрастанием риска по сравнению с первой зоной. Автодорожный профиль находится на низком уровне риска ( $103 \leq R \leq 294$ ) с одиночным значением  $R = 361$  (средний риск). Для аэродромного покрытия в целом прогнозируется низкий (11 значений  $109 \leq R \leq 287$ ) или незначительный (5 значений  $77 \leq R \leq 83$ ) риск. Свайное основание находится на среднем уровне риска ( $305 \leq R \leq 437$ ) при одном низком значении  $R = 281$ . С наибольшей вероятностью ожидаемый риск для ленточных и столбчатых фундаментов – высокий ( $601 \leq R \leq 755$ ), при 1 значении на очень высоком уровне риска ( $R = 802$ ) и 3 значениях – на среднем уровне ( $552 \leq R \leq 574$ ).

При наличии высокотемпературной вечной мерзлоты (третья территориальная зона) уровень риска для автодорожного профиля в основном низкий (15 значений  $101 \leq R \leq 284$  при одном значении  $R = 98$ ); на среднем уровне получены 4 значения ( $319 \leq R \leq 357$ ). Незначительный (3 значения  $76 \leq R \leq 88$ ) и, как правило, низкий (11 значений  $103 \leq R \leq 282$  при одном значении  $R = 363$ ) уровни риска характеризуют аэродромное покрытие. Средний уровень риска ( $321 \leq R \leq 529$ ) характерен для свайного основания. Очень высокий риск прогнозируется для ленточных и столбчатых фундаментов, расположенных в грунтах с малой влажностью (8 значений  $813 \leq R \leq 1000$  и 2 значения  $R = 742$  и  $R = 759$ ); при повышении влажности риск снижается до высокого уровня для глинистых грунтов ( $619 \leq R \leq 673$ ) и до среднего уровня ( $475 \leq R \leq 581$ ) для песчаных.

В целом, потепление климата на  $+2^{\circ}\text{C}$  будет иметь явно выраженные негативные последствия для объектов транспортной инфраструктуры кри-

олитозоны. Прогнозируемые риски в отношении автодорожного профиля и аэродромного покрытия в отдельных случаях достигают среднего уровня (особенно в районах с высокотемпературной мерзлотой). Средний уровень риска является наиболее характерным для свайного основания, причем достаточно часто риск приближается к верхней границе этого уровня и даже иногда переходит на высокий уровень. Ленточные или столбчатые фундаменты в большинстве случаев находятся на высоком или очень высоком уровне прогнозируемых климатических рисков.

### Выводы

Объекты транспортной инфраструктуры, расположенные на вечномерзлых основаниях, при повышении температуры воздуха на  $+2^{\circ}\text{C}$  подвергаются значительным рискам нарушения функциональности. Наибольшую опасность потепление представляет для зданий и сооружений на ленточных и столбчатых фундаментах, наименее подвержены негативному влиянию климатических изменений автодорожные профили и аэродромные покрытия.

Прогнозируемый риск увеличивается по мере возрастания температуры вечномерзлого грунта в основании инфраструктурных объектов транспортной системы.

Обеспечение устойчивого функционирования транспортных систем в криолитозоне требует проведения комплекса инженерно-технических мероприятий по противодействию последствиям климатических изменений. Для объектов с преимущественно низким уровнем риска (не более  $R = 400$  по использованной в настоящей работе шкале уровней риска) необходимо осуществлять постоянный мониторинг их состояния, сформировав материальные и финансовые резервы для оперативного восстановления их функциональности. Для объектов с высокими рисками (свыше  $R = 400$  и, в особенности, при  $R > 600$ ) требуется осуществление комплекса предупреждающих мероприятий, направленных на стабилизацию температурного режима грунтов и недопущение внезапной утраты функциональности транспортной системы как следствия деградации вечной мерзлоты.

### Литература

1. Бабурин В. Л., Бадина С. В., Горячко М. Д., Земцов С. П. [и др.] Оценка уязвимости социально-экономического развития арктической территории России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2016. – № 6. – С. 71–77.
2. Иноземцев С. С., Королев Е. В. Агрессивность эксплуатационных условий дорожно-климатических зон России // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – № 3. – С. 22–26.
3. Лахметкина Н. Ю., Щелкунова И. В., Рогова Д. А. Развитие транспортных систем в цифровой повестке // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 4. – С. 114–120.
4. Пшеничникова Е. С. К вопросу районирования зоны вечной мерзлоты // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – № 2. – С. 15–18.
5. Серова В. А. Проблемы транспортной обеспеченности севера: социальный аспект // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2010. – № 32. – С. 66–71.
6. Тебекин А. В. Развитие логистики в северных и арктических регионах // Журнал исследований по управлению. – 2018. – № 10. – С. 55–63.
7. Трофименко Ю. В., Якубович А. Н. Методика оценки риска утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней (вечной) мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 5. – С. 27–37.
8. Хлебникова Е. И., Катцов В. М., Пикалева А. А., Школьник И. М. Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории Российской Арктики в XXI веке // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 6. – С. 5–19.
9. Якубович А. Н., Якубович И. А., Рассоха В. И. Концептуальные основы моделирования само-восстановления экосистем Крайнего Севера-Востока России, нарушенных при сооружении временных автодорог // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – № 10. – С. 182–186.
10. Якубович А. Н., Якубович И. А. Надежность элементов АТС, описываемых двухфакторной моделью // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – № 1. – С. 7–14.
11. Якунин И. Н., Меньших О. М., Шунгувов Д. М. Исследование влияния высокой температуры окружающей среды на безопасность автотранспортного процесса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 7. – С. 138–145.
12. Hui P., Wei M., Yan-hu M., Long J., Kun Y. Degradation characteristics of permafrost under the effect of climate warming and engineering disturbance along the Qinghai–Tibet Highway // Natural Hazards. – 2015. – Vol. 75(3). – pp. 2589–2605.
13. Kaplan J. O., New M. Arctic climate change with a  $2^{\circ}\text{C}$  global warming: Timing, climate patterns and

vegetation change // Climatic Change. – 2006. – Vol. 79(3–4). – pp. 213–241.

14. Renn O., Klinke A., Schweizer P. Risk Governance: Application to Urban Challenges // International Journal of Disaster Risk Science. – 2018. – Vol. 9(4). – pp. 434–444.

15. Yakubovich A. N., Trofimenco Y. V., Yakubovich I. A., Shashina E. V. A forecast model for a road network's section traffic capacity assessment on a territory of the cryolitozone in conditions of the climate change // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2019. – Vol. 1. – pp. 275–280.

### References

1. Baburin, V. L., Badina, S. V., Goryachko, M. D., Zemcov, S. P. et al. (2016) [Assessment of the Vulnerability of Socio-Economic Development of the Arctic Territory of Russia]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Bulletin of the Moscow University. Series 5: Geography]. Vol. 6, pp. 71–77. (In Russ.).
2. Inozemcev, S. S., Korolev, E. V. (2019) [Aggressiveness of Operational Conditions of Road and Climatic Zones of Russia]. Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrassli [Science and Technology in the Road Industry]. Vol. 3, pp. 22–26. (In Russ.).
3. Lahmetkina, N. Y., Shchelkunova, I. V., Rogova, D. A. (2019) [Development of Transport Systems in the Digital Agenda]. Intellekt. Innovacii. Investicii [Intelligence. Innovations. Investment]. Vol. 4, pp. 114–120. (In Russ.).
4. Pshenichnikova, E. S. (2019) [On the Issue of Zoning the Permafrost Zone]. Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrassli [Science and Technology in the Road Industry]. Vol. 2, pp. 15–18. (In Russ.).
5. Serova, V. A. (2010) [Problems of Transport Security in the North: Social Aspect]. Nacional'nye interesy: prioritety i bezopasnost' [National Interests: Priorities and Security]. Vol. 32, pp. 66–71. (In Russ.).
6. Tebekin, A. V. (2018) [Development of Logistics in the Northern and Arctic Regions]. Zhurnal issledovanij po upravleniyu [Journal of Management Studies]. Vol. 10, pp. 55–63. (In Russ.).
7. Trofimenco, Y. V., Yakubovich, A. N. (2016) [Methodology for Assessing the Risk of Loss Functionality on Highways in the Territories of Permafrost Distribution Due to Predicted Climate Changes]. Bezopasnost' v tekhnosfere [Safety in the Technosphere]. Vol. 5, pp. 27–37. (In Russ.).
8. Hlebnikova, E. I., Katcov, V. M., Pikaleva, A. A., Shkol'nik, I. M. (2018) [Assessment of Changes in Climate Impacts on the Economic Development of the Russian Arctic in the XXI Century]. Meteorologiya i gidrogeologiya [Meteorology and Hydrogeology]. Vol. 6, pp. 5–19. (In Russ.).
9. Yakubovich, A. N., Yakubovich, I. A., Rassoha, V. I. (2012) [Conceptual Bases of Modeling of Self-Restoration of Ecosystems of the Far North-East of Russia, Disturbed During the Construction of Temporary Roads]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]. Vol. 10, pp. 182–186. (In Russ.).
10. Yakubovich, A. N., Yakubovich, I. A. (2016) [Reliability of Vehicle Elements Described by the Two-Factor Model]. Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) [Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)]. Vol. 1, pp. 7–14. (In Russ.).
11. Yakunin, I. N., Men'shii, O. M., Shungulov, D. M. (2019) [Investigation of the Influence of High Ambient Temperature on the Safety of the Road Transport Process]. Intellekt. Innovacii. Investicii [Intelligence. Innovations. Investment]. Vol. 7, pp. 138–145. (In Russ.).
12. Hui, P., Wei, M., Yan-hu, M., Long, J., Kun, Y. (2015) Degradation Characteristics of Permafrost under the Effect of Climate Warming and Engineering Disturbance along the Qinghai–Tibet Highway. Natural Hazards, vol. 75(3), pp. 2589–2605. (In Engl.).
13. Kaplan, J. O., New, M. (2006) Arctic Climate Change with a 2 °C Global Warming: Timing, Climate Patterns and Vegetation Change. Climatic Change, Vol. 79(3–4), pp. 213–241. (In Engl.).
14. Renn, O., Klinke, A., Schweizer, P. (2018) Risk Governance: Application to Urban Challenges. International Journal of Disaster Risk Science, Vol. 9(4), pp. 434–444. (In Engl.).
15. Yakubovich, A. N., Trofimenco, Y. V., Yakubovich, I. A., Shashina, E. V. (2019) A Forecast Model for a Road Network's Section Traffic Capacity Assessment on a Territory of the Cryolitozone in Conditions of the Climate Change. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, Vol. 1, pp. 275–280. (In Engl.).

### Информация об авторах:

**Анатолий Николаевич Якубович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

**ORCID ID:** 0000-0003-0380-068X, **Researcher ID:** O-8331-2016

e-mail: 54081@mail.ru

**Ирина Анатольевна Якубович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации автотранспортных средств и автосервиса, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

**ORCID ID:** 0000-0002-9864-0713

e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 04.03.2021; принята в печать: 13.04.2021.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Information about the authors:**

**Anatoly Nikolaevich Yakubovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of automated control systems, Moscow automobile and road University (MADI), Moscow, Russia

**ORCID ID:** 0000-0003-0380-068X, **Researcher ID:** O-8331-2016

e-mail: 54081@mail.ru

**Irina Anatolievna Yakubovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of maintenance of vehicles and car service, Moscow automobile and road University (MADI), Moscow, Russia

**ORCID ID:** 0000-0002-9864-0713

e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

The paper was submitted: 04.03.2021.

Accepted for publication: 13.04.2021.

The authors have read and approved the final manuscript.