

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

А.Н. Якубович<sup>1</sup>, И.А. Якубович<sup>2</sup>

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

<sup>1</sup>e-mail: 54081@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

**Аннотация.** Предмет. Транспортная инфраструктура криолитозоны России, эксплуатация которой существенно отличается от климатических условий, предусмотренных при проектировании и строительстве.

**Цели.** Количественно оценить прогнозируемое снижение функциональности объектов транспортной инфраструктуры в наиболее вероятном диапазоне климатических изменений.

**Методология.** Математическое моделирование, осуществляемое на основе законов теплопереноса в грунте и между грунтом и окружающим воздухом, в соответствии с реальным температурным режимом. По результатам моделирования оценивается функциональность объекта  $U$ . Для базового (неизмененного) климата принимается  $U = 1$ ; значение  $U = 0$  соответствует полному исчерпанию проектного запаса и неприемлемо большому риску нарушения функциональности объекта.

**Результаты.** Практически во всех рассмотренных климатических и грунтовых условиях потепление приводит к значимому снижению функциональности. При заглублении основания объекта менее 5 м, для любых грунтовых условий прогнозируется неприемлемо большое снижение функциональности, уже начиная с потепления  $+2^\circ \text{C}$  (в климатических условиях Якутска  $U < 0,5$ , для Чендальска и Кольского полуострова  $U < 0,25$ ). При потеплении до  $+3^\circ \text{C}$  функциональность  $U > 0,5$  сохраняется для Якутска при заглублении не менее 7 м, для Чары, Чендальска и Кольского полуострова функциональность  $U > 0,5$  не достигается даже при заглублении 9 м. В условиях Уренгоя снижение функциональности, при прочих равных условиях, прогнозируется на 0,05–0,1 больше, чем для Якутска. Влажные, особенно глинистые грунты, отличаются меньшим (на 0,1–0,2) снижением функциональности, чем грунты низкой влажности.

**Выводы.** Объекты транспортной инфраструктуры в криолитозоне с заглублением основания 5 м и более подвергаются существенным рискам снижения своей функциональности, которые, уже начиная с потепления  $+2^\circ \text{C}$ , должны нивелироваться соответствующими инженерно-техническими мероприятиями, направленными на защиту температурного режима грунтов основания. В отношении объектов с заглублением основания менее 5 м эти мероприятия должны реализовываться в режиме опережения негативных климатических изменений.

**Ключевые слова:** транспортная инфраструктура, изменение климата, моделирование рисков.

**Для цитирования:** Якубович, А.Н., Якубович, И.А. Прогнозирование влияния климатических изменений на функциональность транспортной инфраструктуры криолитозоны России // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 104–110.

## FORECASTING CLIMATE CHANGE IMPACT ON THE FUNCTIONALITY OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN THE CRYOLITH ZONE OF RUSSIA

A.N. Yakubovich<sup>1</sup>, I.A. Yakubovich<sup>2</sup>

Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>1</sup>e-mail: 54081@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

**Abstract. Object.** Transport infrastructure of the cryolithozone of Russia, the operation of which is significantly different from the climatic conditions provided for in the design and construction.

**Purposes.** Quantify the projected decline in the functionality of transport infrastructure in the most likely range of climate change.

**Methodology.** Mathematical modeling based on the laws of heat transfer in the soil and between the soil and the ambient air; in accordance with the real temperature regime. Based on the simulation results, the functionality of the  $U$  object is evaluated. For the base (unaltered) climate,  $U=1$  is assumed; the value  $U=0$  corresponds to the

complete exhaustion of the design reserve and an unacceptably high risk of disruption of the facility's functionality.

**Results.** In almost all considered climatic and soil conditions, warming leads to a significant decrease in the functionality. When the base of the object is buried less than 5 m, for any ground conditions, an unacceptably large decrease in functionality is predicted, already starting with a warming of  $+2^{\circ}\text{C}$  (in the climatic conditions of Yakutsk  $U < 0,5$ , for Cherdalsk and the Kola Peninsula  $U < 0,25$ ). Upon warming to  $+3^{\circ}\text{C}$  functionality  $U > 0,5$  remains to Yakutsk when the depth is not less than 7 m, for Chara, Cherdalsk and the Kola Peninsula functionality  $U > 0,5$  is not reached even at the depth of 9 m. In the conditions of Urengoy, the decrease in functionality, ceteris paribus, is projected to be 0,05-0,1 more than for Yakutsk. Wet, especially clay soils, are less (0,1-0,2) reduced functionality in warming than low humidity soils.

**Summary.** Transport infrastructure facilities in the cryolithozone with a depth of 5 m or more, are exposed to significant risks of reducing their functionality, which, starting from the warming of  $+2^{\circ}\text{C}$  relative to the base climate, should be eliminated by appropriate engineering measures aimed at protecting the temperature regime of permafrost soils of the base. For facilities with a base depth of less than 5 m, these measures should be implemented in advance of negative climate change.

**Keywords:** transport infrastructure, climate change, risk modeling.

**Cite as:** Yakubovich, A.N., Yakubovich, I.A. (2019) [Forecasting climate change impact on the functionality of the transport infrastructure in the cryolith zone of Russia]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovation. Investments]. Vol. 1, p. 104-110.

### Введение

Территории более или менее массового распространения вечномёрзлых и многолетнемёрзлых грунтов занимают 60–65% площади России. Наземная транспортная сеть криолитозоны является важным, а зачастую и единственным, средством перемещения людей и грузов по обширным северным территориям. Это обуславливает высокую значимость ее бесперебойного функционирования в целях социально-экономического развития многих удаленных от центра регионов страны.

Деградация вечной мерзлоты, обусловленная продолжающимися глобальными изменениями климата, является серьезной угрозой для нормального функционирования транспортной системы криолитозоны. Существующие объекты транспортной инфраструктуры проектировались по нормам, подразумевающим условия эксплуатации, которые более не являются актуальными (особенно в отношении годовой динамики температуры воздуха и связанного с ним температурного режима приповерхностного слоя вечномёрзлого грунта) [10], причем этот разрыв между планировавшимися и реальными условиями эксплуатации продолжает возрастать. Увеличение, под влиянием климатических изменений, мощности сезонно-талого слоя, при превышении им своих нормативных значений приводит к снижению прочности и возрастанию деформативности оснований объектов транспортной инфраструктуры, что, в свою очередь, вызывает ограничение их функциональности и сокращение сроков эксплуатации [1, 8].

Многоаспектное влияние потепления климата на функционирование транспортной системы северного региона рассмотрено в [2]. Количественная оценка рисков снижения функциональности авто-транспортной сети криолитозоны, выполненная в [7], показывает, что начиная с величины потепле-

ния  $+2^{\circ}\text{C}$  можно уверенно прогнозировать существенное ухудшение эксплуатационного состояния автодорог и снижение общей функциональности дорожной сети на обширных территориях.

В то же время, важное значение для функционирования территориальной транспортной системы имеет и эксплуатационное состояние иных объектов транспортной инфраструктуры – мостов, вокзалов, зданий технического обслуживания и ремонта транспортных средств, и т. д. Вследствие особенностей взаимодействия фундаментов этих объектов с вечномёрзлым основанием, определение для них климатических рисков требует разработки подходов и методов, отличающихся от подходов и методов, используемых в отношении автодорожной сети [7]. Наиболее распространенными в условиях криолитозоны являются свайные фундаменты; особенности их работы в составе мостовых сооружений рассмотрены, в частности, в [3, 5].

Несущая способность, как отдельной сваи, так и свайного основания в целом, обуславливается прочностными характеристиками грунта по всей глубине погружения сваи [4]. Вероятностный характер климатических изменений закономерно проявляется и в температурном режиме грунтового массива, от которого зависит прочность и деформативность вечномёрзлого грунта, в котором размещена свая. Несущая способность в изменяющихся климатических условиях, может, таким образом, рассматриваться как случайная величина, с соответствующим законом распределения и параметрами этого закона [6, 9], определяемыми по результатам моделирования температурного состояния грунтового массива на протяжении достаточно длительного периода (не менее 1 года).

Такой подход возможен, если существуют достаточно убедительные предположения в отношении прогнозируемых количественных значений

параметров, описывающих климатические изменения. При отсутствии же таких предположений (а это наиболее типичный случай) более целесообразно оценивать снижение несущей способности свайного основания, а также соответствующее понижение функциональности объекта транспортной инфраструктуры, для отдельных значений (или отдельных сочетаний значений) климатических параметров. Это позволит получить количественную картину изменения функциональности в широком диапазоне возможных климатических изменений.

#### Методика анализа

Основным показателем, количественно характеризующим состояние объекта транспортной инфраструктуры и функционально зависящим от температурного режима территории, является:

$$K = 4b\Delta \sum R_{sh,i}(t_i) + b^2 R(t_b) \quad (1),$$

где

$R_{sh,i}$  – расчетное сопротивление по грунту для  $i$ -го слоя грунта по вертикали, МПа;  $R$  – расчетное давление на грунт под нижним концом сваи, МПа;  $t_i$  – средняя температура грунта в пределах  $i$ -го слоя;  $t_b$  – температура грунта под нижним концом сваи;  $\Delta$  – высота  $i$ -го слоя, м;  $b$  – поперечный размер сваи, м.

В течение года, под влиянием теплообмена грунтового массива с окружающей средой в сочетании с процессами теплопереноса в самом грунтовым массиве, значения  $t_i$  и  $t_b$  изменяются, а вместе с ними изменяется  $K$ . С целью количественной оценки годовой динамики данного показателя выполняется моделирование теплопереноса в грунте на протяжении целого года – для температурного режима воздуха, соответствующего базовому (неизмененному) климату. Определенное по результатам моделирования наименьшее за год значение  $K_0$  считается соответствующим максимально возможной функциональности объекта транспортной инфраструктуры  $U_{\max}$ .

Показатель функциональности  $U$  принимается нормированным в диапазоне  $[0; 1]$  и функционально связанным с показателем состояния объекта  $K$ ; таким образом,  $U_{\max} = U(K_0) = 1$ . Снижение функциональности проявляется в уменьшении запаса, отражаемого в значении  $K_0$  и составляющего, в соответствии с нормами проектирования, 40%. Уменьшение этого запаса, происходящее под влиянием деградации вечной мерзлоты в результате климатических изменений, приводит к повышенному риску чрезмерных осадок объекта, вплоть до возможности его полного разрушения, что количественно оценивается пониженными значениями  $U$ . Полное исчерпание запаса сопоставляется с нулевой функциональностью объекта, то есть  $U_{\min} = U(K_0/1,4) = 0$ . В промежутке от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  принимается линейная зависимость  $U(K)$ .

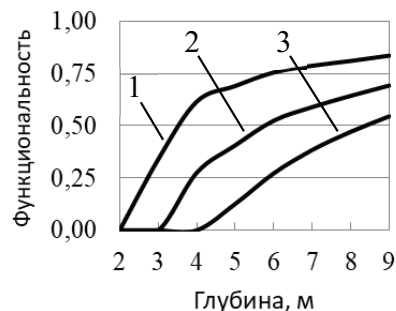
С целью количественной оценки прогнозируемого изменения функциональности объекта, вышеописанная процедура (моделирование температурного режима грунта, определение динамики изменения  $K$  в течение года и выявление минимального значения  $K_{\Delta t}$ ) повторяется для прогнозных климатических условий, после чего находится показатель функциональности  $U(K_{\Delta t})$ , соответствующий изменившемуся состоянию климата.

#### Результаты численного моделирования

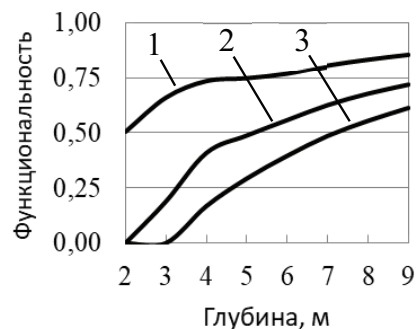
При моделировании состояния грунтового массива рассматривался сценарий климатических изменений, для которого повышение среднегодовой температуры воздуха (на величину  $\Delta t$ , одинаковую по всем месяцам) сопровождалось повышением температурной контрастности. В результате положительные температуры воздуха (наблюдаемые в период с конца весны до начала осени) принимались повышенными на величину  $2\Delta t$  относительно базового неизмененного климата, а отрицательные назначались исходя из повышения среднегодовой температуры на  $\Delta t$ .

Влияние такого сценария климатических изменений, в диапазоне их интенсивности от  $+1^\circ \text{C}$  до  $+3^\circ \text{C}$ , на ожидаемую функциональность объектов транспортной инфраструктуры в климатических условиях Якутска, показано на рис. 1. Параметры базового климата принимались по климатическим справочникам, содержащим результаты многолетних инструментальных наблюдений за температурой воздуха.

а)



б)



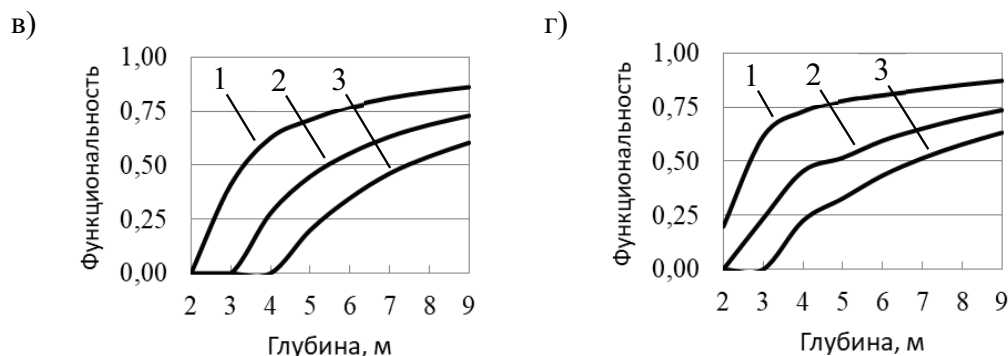


Рисунок 1. Влияние потепления климата на функциональность объектов транспортной инфраструктуры в условиях Якутска: а) – песчаный маловлажный грунт, б) – песчаный сильно влажный грунт, в) – глинистый грунт, г) – глинистый сильно влажный грунт; 1, 2, 3 – потепление на  $+1^{\circ}\text{C}$ ,  $+2^{\circ}\text{C}$ ,  $+3^{\circ}\text{C}$  соответственно

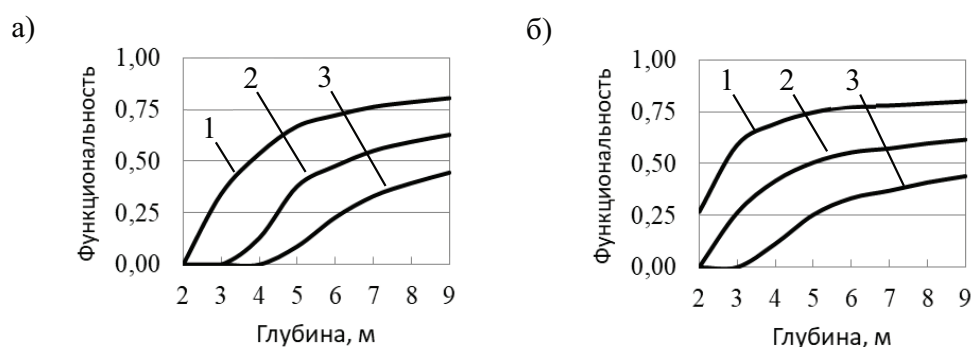


Рисунок 2. Влияние потепления климата на функциональность объектов транспортной инфраструктуры в условиях Уренгоя: а) – песчаный маловлажный грунт, б) – глинистый сильно влажный грунт; 1, 2, 3 – см. рис.1

На рисунке 2 показано прогнозируемое снижение функциональности объектов транспортной инфраструктуры в климатических условиях Уренгоя. Рас-

смотрены два наиболее типичных вида грунтовых условий в основании объекта: песчаный грунт низкой влажности, и водонасыщенные глины.

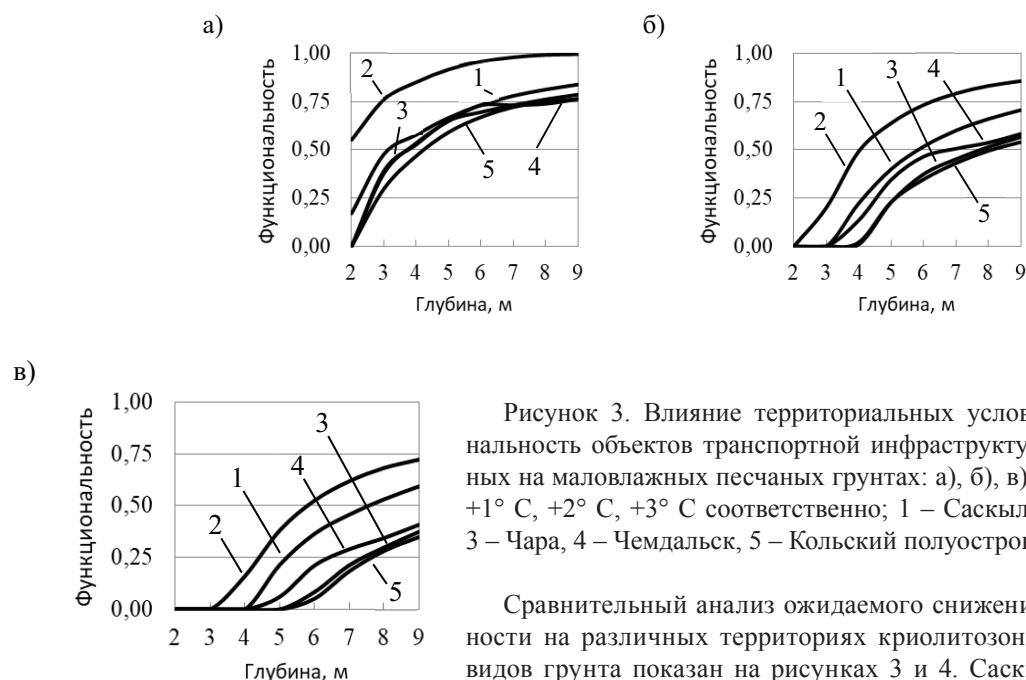


Рисунок 3. Влияние территориальных условий на функциональность объектов транспортной инфраструктуры, расположенных на маловлажных песчаных грунтах: а), б), в) – потепление на  $+1^{\circ}\text{C}$ ,  $+2^{\circ}\text{C}$ ,  $+3^{\circ}\text{C}$  соответственно; 1 – Саскылах, 2 – Сусуман, 3 – Чара, 4 – Чемдальск, 5 – Кольский полуостров

Сравнительный анализ ожидаемого снижения функциональности на различных территориях криолитозоны для основных видов грунта показан на рисунках 3 и 4. Саскылах и Сусуман

характеризуются наличием низкотемпературной, преимущественно сплошной вечной мерзлоты. Чара расположена в районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты. Чемдальск и, осо-

бенно, территория Кольского полуострова отличаются высокотемпературной вечной мерзлотой редкоостровного характера.

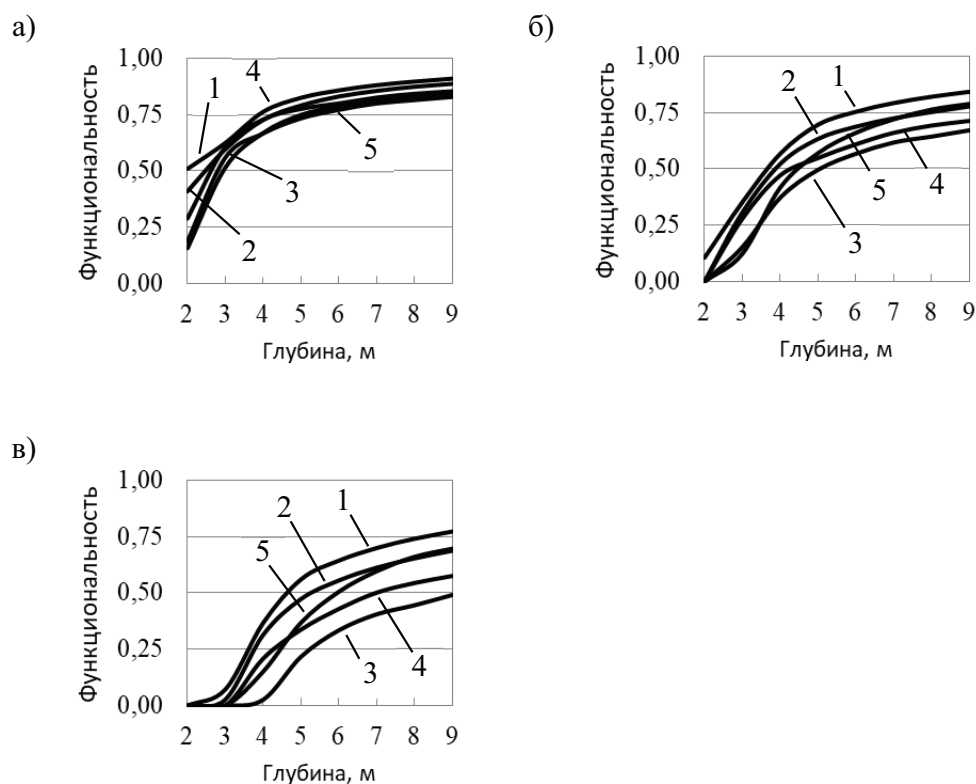


Рисунок 4. Влияние территориальных условий на функциональность объектов транспортной инфраструктуры, расположенных на высоко влажных глинистых грунтах; обозначения см. рисунок 3.

### Обсуждение

Результаты моделирования показывают достаточно четкое разделение объектов транспортной инфраструктуры на 2 класса – в зависимости от степени опасности для них возможного изменения климата. Объекты, основание которых образовано сваями глубиной 5 м и менее, подвергаются очень высоким рискам снижения своей функциональности, вплоть до нулевого уровня. При относительно небольшом потеплении до  $+1^{\circ}\text{C}$  сваи глубиной 5 м, как правило, еще обеспечивают функциональность  $U = 0,65\text{--}0,85$ , что можно считать средним уровнем климатического риска в отношении объекта транспортной инфраструктуры. Однако потепление до  $+2^{\circ}\text{C}$  зачастую уже приводит к ожидаемому снижению функциональности  $U < 0,5$  (при наличии грунтов низкой влажности – рисунки 1а, 1в, 2а, 3б). Потепление до  $+3^{\circ}\text{C}$  для объектов этой группы можно считать катастрофическим; функциональность снижается до диапазона  $U = 0\text{--}0,35$  – неприемлемо большой уровень климатических рисков (исключение составляют территории распространения низ-

котемпературных вечномерзлых грунтов – Сусуман и Саскылах).

Объекты на основаниях с глубиной свай от 6 м подвергаются меньшим климатическим рискам, которые закономерно понижаются для более заглубленных конструкций основания. Однако, при отдельных сочетаниях климатических и грунтовых условий, риски могут стать значительными. Так, для территорий Чары, Чемдальска и Кольского полуострова при потеплении до  $+2^{\circ}\text{C}$  функциональность объектов на песчаных грунтах низкой влажности, даже при заглублении 9 м, снижается до уровня  $U < 0,6$  – рис. 3б, а при потеплении до  $+3^{\circ}\text{C}$  функциональность прогнозируется на уровне  $U = 0,35\text{--}0,4$  – рисунок 3в.

Сравнение рисунков 3 и 4 показывает, что при прочих равных условиях прогнозируемая функциональность  $U$  в изменившихся климатических условиях несколько выше у объектов, расположенных на влажных глинистых грунтах – на  $0,1\text{--}0,2$  по сравнению с объектами, основание которых образовано маловлажными песчаными грунтами. Это



объясняется более высокой теплоемкостью воды по сравнению с теплоемкостью сухого скелета грунта; соответственно, при потеплении климата проникновение дополнительной теплоты во влажные грунты затруднено, и снижение прочностных и деформационных свойств грунтового массива происходит в меньшей степени.

#### Выводы

По результатам моделирования установлено, что климатические риски в отношении объектов транспортной инфраструктуры криолитозоны являются значительными, и должны учитываться наряду с рисками снижения функциональности дорожной

сети. Объекты на свайных основаниях с глубиной менее 6 м подвергаются повышенному риску уже при потеплении до +2° С; инженерная защита этих объектов должна осуществляться темпами, опережающими климатические изменения на территории. Для объектов с глубиной свайного основания 6 м и более, целесообразность повышения их функциональности в изменяющихся климатических условиях, а также виды, объемы и сроки проведения соответствующих инженерно-технических мероприятий, должны устанавливаться с учетом дополнительного технико-экономического анализа.

#### Литература

1. Брушков, А.В. Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений / А.В. Брушков // Инженерные изыскания. – 2015. – № 14. – С. 4-17.
2. Егорова, Т.П. Влияние климатических изменений на функционирование транспортной системы в Арктических районах Якутии / Т.П. Егорова // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера. – Сыктывкар: Изд-во ООО «Коми республиканская типография». – 2016. – С. 147-151.
3. Ельцова, В.Ю. О нормировании и обеспечении надежности мостов / В.Ю. Ельцова // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 133-138.
4. Золтан, О. Влияние параметров механики грунта на пригодность к эксплуатации мостов арочной конструкции / Орбан Золтан // Интеллектуальные системы в производстве. – 2006. – № 2. – С. 190-199.
5. Рекунов, С.С. Об оценке надежности и восстановлении эксплуатационных качеств мостовых сооружений / С.С. Рекунов // Транспортные сооружения. – 2016. – № 2. – С.1-8.
6. Сушев, Л.А. Расчет несущей способности и надежности железобетонной сваи на стадии эксплуатации по критерию прочности грунта в условиях вечной мерзлоты / Л.А. Сушев, О.С. Жданова // Наука сегодня: теория и практика: материалы международной научно-практической конференции. Вологда, 24 августа 2016 г. – Вологда: Изд-во ООО «Маркер», 2016. – С. 134-135.
7. Трофименко, Ю.В. Методика оценки риска утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней (вечной) мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями / Ю.В. Трофименко, А.Н. Якубович // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 5. – С. 27-37.
8. Хлебникова, Е.И. Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс / Е.И. Хлебникова, Т.А. Дацюк, И.А. Салл // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – № 574. – С. 125-178.
9. Якубович, А.Н. Оценка обеспеченности ведущей функции потока отказов / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2011. – № 1. – С. 16а-21.
10. Якубович, И.А. Анализ норм проектирования объектов автотранспортной инфраструктуры на чувствительность результатов расчетов к прогнозируемым климатическим изменениям / И.А. Якубович // Актуальные проблемы современной науки. – 2017. – № 1. – С. 208-213.

#### References

1. Brushkov, A.V. (2015) [Global environmental change, the response of permafrost and the stability of engineering structures]. *Inzhenernyye izyskaniya* [Engineering survey]. No.14. pp. 4–17. (In Russ.)
2. Egorova, T.P. (2016) [The impact of climate change on the transport system in Arctic regions of Yakutia]. *Aktual'nyye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditel'nykh sil Severa* [Topical issues: ways and mechanisms of development of the productive forces of the North]. Syktyvkar: Komi Republican printing house, pp.147–151. (In Russ.)
3. El'cova, V.Yu. (2013) [On rationing and ensuring the reliability of bridges]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific national University]. No.1, pp. 133–138.
4. Zoltan, O. (2006) [The effects of mechanics parameters of the soil on the serviceability of bridges arched design]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production]. No.2, pp. 190–199. (In Russ.)

5. Rekunov, S.S. (2016) [About the assessment of reliability and restoration of operational qualities of bridge constructions]. *Transportnyye sooruzheniya* [Transport construction]. No.2, pp. 1–8. (In Russ.)
6. Sushev, L.A. (2016) [Calculation of bearing capacity and reliability of reinforced concrete piles at the stage of operation according to the criterion of soil strength in permafrost]. *Nauka segodnya: teoriya i praktika: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science today: theory and practice: proceedings of the international scientific-practical conference]. Vologda: Publishing house “Marker”, pp.134–135. (In Russ.)
7. Trofimenko, Ju.V. (2016) [Method of estimating risk of loss of functionality of highways in the territories of distribution of long-term (eternal) permafrost in connection with the projected climatic changes]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. No.5, pp. 27–37. (In Russ.)
8. Hlebnikova, E.I. (2014) [The impact of climate change on construction, ground transportation, fuel and energy complex]. *Trudy glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova* [The works of the main geophysical Observatory named after A.I. Voeikov]. No. 574, pp.125–178. (In Russ.)
9. Yakubovich, A.N. (2011) [The assessment of security leading function of flow of failures]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)* [Bulletin of the Moscow state automobile and road technical University (MADI)]. No.1, pp.16–21. (In Russ.)
10. Yakubovich I.A. (2017) [The analysis of norms of design of objects of road infrastructure on the sensitivity of calculation results to projected climate change]. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki* [Actual problems of modern science]. No.1, pp. 208–213. (In Russ.)

**Информация об авторах:**

**Якубович Анатолий Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия  
e-mail: 54081@mail.ru

**Якубович Ирина Анатольевна** – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации авто-транспортных средств и автосервиса, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия  
e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2018; принята в печать 04.02.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Information about the authors:**

**Yakubovich Anatoly Nikolayevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of Automated Control Systems, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia  
e-mail: 54081@mail.ru

**Yakubovich Irina Anatolyevna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, the Department of Operation of Motor Vehicles and Car Service, Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia  
e-mail: yakubovich\_irina@mail.ru

The paper was submitted: 05.12.2018.

Accepted for publication: 04.02.2019.

The authors have read and approved the final manuscript.