

# ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ТРАНСПОРТОМ И АДАПТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ В ЗОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ



**Ю.В. Трофименко, А.Н. Якубович**

**Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**

Рассмотрены модели, методы, а также результаты обоснования мероприятий по сокращению выбросов парниковых газов (ПГ) транспортным комплексом на период до 2030 г. для повышения его экологической безопасности, а также оценки эффективности мер (использования сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) – термостабилизаторов) по адаптации объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) автомобильного, железнодорожного, воздушного и водного транспорта при реализации разных сценариев климатических изменений на территориях распространения вечной мерзлоты. Для участков автомобильных и железных дорог (в насыпи), взлетно-посадочных полос аэродромов на рассмотренных территориях в ближайшие 30 лет не прогнозируются высокие климатические риски, требующие обязательного использования термостабилизаторов. Для этих объектов могут применяться менее затратные защитные мероприятия. Свайное основание мостов и иных транспортных сооружений может быть достаточно эффективно защищено термостабилизаторами от последствий климатических изменений. В отношении ленточного и столбчатого фундаментов портовых сооружений, других производственных объектов на рассмотренных территориях использование СОУ является очень эффективной мерой по снижению климатических рисков. Для всех видов ОТИ установлено возрастание ожидаемой эффективности мер по их адаптации в случае перехода от сплошной мерзлоты к ее островному и редкоостровному виду. Зафиксирована пониженная эффективность использования термостабилизаторов в грунтах низкой влажности, в особенности при песчаных грунтах для всех видов ОТИ.

*Ключевые слова: изменение климата, парниковые газы, транспортный комплекс, экологическая безопасность, криолитозона, объекты транспортной инфраструктуры, адаптация*

## Justification of Measures to Reduce Greenhouse Gases Emissions by Transport and Adaptation of Transport Infrastructure Facilities to Climate Change in Permafrost Zones

**Yu.V. Trofimenko, A.N. Yakubovich**

**Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 125319 Moscow, Russia**

The models, methods, as well as the results of the justification of measures to reduce greenhouse gases (GHG) emissions by the transport complex for the period up to 2030 to improve its environmental safety, as well as assessing the effectiveness of measures (the use of seasonal cooling devices (SOA) – heat stabilizers) are considered transport infrastructure facilities (TIFs) of road, rail, air and water transport when implementing different climate change scenarios in the areas of permafrost. For sections of roads and railways (in the embankment), runways of airfields in the territories examined in the next 30 years, high climatic risks that require the use of heat stabilizers are not forecasted. For these objects can be applied less costly protective measures. The pile foundation of bridges and other transportation facilities can be sufficiently effectively protected by heat stabilizers from the effects of climate change. In relation to the strip and raft foundations of port facilities, other production facilities in the territories examined, the use of the SOA is a very effective measure to reduce climate risks. An increase in the expected effectiveness of measures to adapt them in the case of transition from continuous permafrost to its island and rare island species has been established for all types of TIFs. The reduced efficiency of the use of heat stabilizers in soils of low humidity, especially in sandy soils for all types of TIFs, was recorded.

*Keywords: climate change, greenhouse gases, transport complex, environmental safety, permafrost zone, transport infrastructure facilities, adaptation*

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-55-61

**Т**ехнологическое развитие транспорта в последние годы резко активизировалось, что связано с использованием информационных и геоинформационных систем, альтернативных видов топлива и

источников энергии, интеграцией отдельных видов транспорта в мультимодальные системы. Это, в свою очередь, приводит к изменению проблемного поля по обеспечению экологической безопасности (устойчивости) транс-

портной деятельности: меняется значимость (актуальность) традиционных [1, 2] и возникают новые вызовы (проблемы), которые необходимо учитывать и находить рациональные пути их решения. В их числе:

1) увеличение потребления природных энергоресурсов и выбросов парниковых газов (ПГ) транспортным комплексом, несмотря на повышение энергоэффективности отдельных транспортных средств;

2) рост уязвимости объектов транспортной инфраструктуры от чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного [3], техногенного и социального (актов незаконного вмешательства) характера;

3) повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха вблизи автомагистралей  $\text{NO}_x$ , дисперсных частиц размером менее 10 мкм и др. [4];

4) рост числа людей, подверженных повышенному уровню транспортного шума, электромагнитных полей, создаваемых транспортом на урбанизированных территориях;

5) рост киберпреступности, в том числе в отношении обеспечения устойчивого функционирования транспортных систем и технологий [5];

6) рост эстетической деградации среды обитания — увеличение площадей отчуждения территории под транспортную инфраструктуру и стоянки, размещение отходов эксплуатации транспорта;

7) рост рисков негативных последствий применения новых транспортных технологий в связи с кратным усложнением (глобализацией) транспортных систем.

Рассмотрим более подробно первые два из перечисленных вызовов (проблем).

В настоящее время отсутствует общепризнанная теория связи климатических изменений и антропогенных выбросов ПГ, в том числе связанных с транспортной деятельностью, которая составляет почти 11 % совокупных антропогенных выбросов ПГ в Российской Федерации [6, 7]. Не решена пока и другая задача — количественной оценки влияния возможных климатических изменений на надежность (потери функциональности) инженерных объектов, в том числе объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ). Среди специа-

листов, политиков и общественности преобладает мнение, в соответствии с которым можно говорить только о принципиальном наличии связей между антропогенными выбросами ПГ, изменениями климата и потерей функциональности объектов. Обосновывается это наблюдаемым ростом числа аномальных природных явлений, которые вызывают ЧС с тяжелыми последствиями для здоровья людей, имущества и окружающей среды.

Отсутствие научной теории описания указанных выше процессов и явлений заставляет исследователей при разработке математических моделей, прогнозов и обоснований мер регулирования (управления) в данной предметной области принимать рабочие гипотезы, основанные на здравом смысле, мнении экспертов, обобщении отечественного и зарубежного опыта, результатах многолетних наблюдений. Например, для обоснования мероприятий, препятствующих климатическим изменениям, принята линейная зависимость рисков возможных климатических изменений от роста антропогенных выбросов ПГ, в том числе транспортом.

При обосновании мероприятий по адаптации ОТИ принималось допущение, что наибольший риск потери их функциональности в связи с климатическими изменениями возникает на территориях распространения вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов криолитозоны России. Связано это с тем, что климатические изменения, происходящие непрерывно в течение нескольких десятилетий на таких экологически уязвимых территориях, ведут к существенному снижению несущей способности, росту осадки оснований и фундаментов ОТИ [8]. В некоторых диапазонах параметров состояния мерзлого грунта возможно понижение несущей способности оснований ОТИ в несколько раз [9]. Поэтому требуется обоснование и превентивная реализация инженерно-технических мероприятий, сни-

жающих климатические риски [10].

Подходы к количественной оценке климатических рисков [11] основаны на оценке степени деградации мерзлого грунта, основным показателем которой является возрастающая при потеплении климата среднегодовая мощность сезонно-талого слоя. Различия в природно-климатических и грунтовых условиях отдельных территорий криолитозоны [12] требуют дифференцированного подхода как к выбору наиболее эффективных мероприятий в части оптимизации параметров конструкции ОТИ, так и средств инженерной защиты. Главной целью процедуры адаптации ОТИ к климатическим изменениям является сохранение температурного режима вечномерзлых грунтов в диапазонах, принятых при проектировании и строительстве этих объектов [13]. Наибольшая эффективность сохранения температурного режима грунтов достигается при использовании сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) — термостабилизаторов, которые обеспечивают отвод теплоты из грунта в течение летнего периода [14], что позволяет сформировать в грунтовом массиве ядро холода и сохранить его в период положительных температур воздуха (оттаивание грунта).

Рассмотрим разработанные модели, методы и результаты обоснования мероприятий по сокращению валовых выбросов ПГ транспортным комплексом на период до 2030 г., а также оценке эффективности мер по адаптации ОТИ к возможным климатическим изменениям.

### *Модели и методы*

**Снижение выбросов ПГ транспортом.** В основе методического подхода к инвентаризации (оценке) выбросов ПГ всех видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, водного, воздушного и дорожного хозяйства) и обоснованию мероприятий по снижению выбросов ПГ лежат требования руководящих принципов и

указаний Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [15], рекомендации Всемирной метеорологической организации и Программы ООН по окружающей среде, а также обобщение отечественного и зарубежного опыта государственного и рыночного регулирования выбросов парниковых газов транспортом.

**Адаптация ОТИ к климатическим изменениям.** Основным методом прогнозирования климатических изменений и оценки их ожидаемых последствий для ОТИ, обоснования мероприятий по адаптации в настоящей работе является имитационное (статистическое) моделирование. Динамика изменения температуры воздуха считалась главным фактором, влияющим на температурный режим вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов. Рассмотрены следующие сценарии изменения температуры.

*Сценарий 1. Повышение контрастности климата* — соотношение между температурами воздуха в летний и зимний период. В рамках данного сценария все среднемесячные положительные температуры увеличиваются на величину  $\Delta T$ ; среднемесячные отрицательные — уменьшаются на  $\Delta T^-$ , величина которой определяется из условия сохранения среднегодовой температуры на неизменном уровне.

*Сценарий 2. Потепление климата* — все среднемесячные температуры воздуха увеличиваются на  $\Delta T$ . Соответственно, и среднегодовая температура при этом также возрастает на  $\Delta T$ .

*Сценарий 3. Потепление в сочетании с повышением контрастности климата*, когда сначала на  $\Delta T_2$  повышаются все среднемесячные температуры, а затем контрастность климата дополнительно повышается еще на величину  $\Delta T_1$ .

Во всех сценариях изменение температуры воздуха является случайной величиной  $\Delta T^{\text{случ}}$ . Для учета вероятностного характера климатических изменений при

моделировании рассматривалось по три реализации двух взаимосвязанных случайных величин  $\Delta T_1^{\text{случ}} = \{\Delta T_1^{\text{ср}} - 1 \text{ }^\circ\text{C}; \Delta T_1^{\text{ср}}; \Delta T_1^{\text{ср}} + 1 \text{ }^\circ\text{C}\}$  и  $\Delta T_2^{\text{случ}} = \{\Delta T_2^{\text{ср}} - 1 \text{ }^\circ\text{C}; \Delta T_2^{\text{ср}}; \Delta T_2^{\text{ср}} + 1 \text{ }^\circ\text{C}\}$ , где  $\Delta T_1^{\text{ср}}$  и  $\Delta T_2^{\text{ср}}$  — экзогенно задаваемые средние значения, определяющие интенсивность повышения контрастности либо потепления. У обеих случайных величин был принят нормальный закон распределения со средним значением  $\Delta T^{\text{ср}} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вариативность нормального распределения определялась из условия отклонения температуры от среднего значения на величину  $\varepsilon = \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  не чаще 1 раза в 50 лет, что соответствует вероятности  $p_{\pm 2} = 0,01$ .

Процедура оценки величины климатического риска в отношении объекта транспортной инфраструктуры включала:

- определение взаимосвязанных значений  $T$  и  $v$  через определенные интервалы времени на протяжении двух среднестатистических лет; эти значения были получены как для базового состояния климата, так и для трех вариантов измененного климата (каждому варианту соответствовала своя реализация  $\Delta T^{\text{случ}}$ );

- моделирование, на основе уравнений теплопереноса, динамики температурного режима мерзлого грунтового массива в основании ОТИ по четырем состояниям климата — базовому и трем сценариям климатических изменений;

- анализ температурного режима грунта и выявление по каждому климатическому сценарию состояния грунтового массива с наихудшим за два рассмотренных года показателем функциональности объекта (минимальной несущей способностью или максимальной осадкой);

- построение зависимостей показателя функциональности от величины негативных последствий; определение средневзвешенных негативных последствий, которые интерпретировались как климатический риск в отношении рассмотренного ОТИ; итоговая

величина риска приводилась к диапазону  $R \in [0; 1000]$ , баллов. В пределах диапазона  $R$  выделяют следующие уровни риска: незначительный ( $R \leq 100$ ), низкий ( $100 < R \leq 300$ ), средний ( $300 < R \leq 600$ ) и высокий ( $R > 600$ ).

В случаях, когда в отношении ОТИ прогнозировался высокий уровень климатического риска, рассматривались мероприятия (установка термостабилизаторов) по его снижению и оценивалась их эффективность. При этом выполнялась повторная оценка риска в вышеприведенной последовательности; наличие СОУ учитывалось при моделировании температурного режима грунта, что, в свою очередь, оказывало влияние на улучшение наихудших на протяжении 2 лет показателей функциональности ОТИ и далее — на снижение величины риска.

### *Результаты и обсуждение*

**Снижение выбросов ПГ транспортом.** В результате анализа и обобщения отечественного и зарубежного опыта установлено, что снижение выбросов ПГ от транспорта возможно за счет реализации мероприятий, объединенных в следующие три группы:

*I группа — повышение энергоэффективности* ТС и транспортных технологий, использующих традиционные виды моторного топлива;

*II группа — диверсификация использования различных источников энергии* с меньшим выбросом ПГ для ТС всех видов транспорта;

*III группа — управление мобильностью* — сокращение избыточного, нерационального, необоснованного перемещения грузов и пассажиров, сдерживание гипермобильности населения за счет развития информационных систем сбора, интеллектуальной обработки, анализа и обмена данными, а также использования расширенных возможностей коммуникации между человеком, ТС и дорожной инфраструктурой.

Мероприятия I группы предусматривают разработку и внед-

**Таблица 1. Эффективность мероприятий по снижению климатических рисков в отношении объекта транспортной инфраструктуры (автомобильного моста в г. Якутске)**

**Table 1. The effectiveness of measures to reduce climate risks in relation to the object of transport infrastructure (road bridge in Yakutsk)**

Состояние климата { $\Delta T_1$ ; $\Delta T_2$ }	Вероятность состояния $p$	Без мероприятий по снижению риска			При установке термостабилизаторов		
		$K$	$U$	$D$	$K$	$U$	$D$
Базовое	–	2,602	–	–	–	–	–
{+1 °C; +1 °C}	0,2805	2,461	0,765	0,235	2,534	0,887	0,133
{+2 °C; +2 °C}	0,4390	2,331	0,548	0,452	2,393	0,652	0,348
{+3 °C; +3 °C}	0,2805	2,231	0,382	0,618	2,285	0,472	0,528
Климатический риск, балл		$R_0 = 438$			$R_1 = 333$		

$K$  – показатель состояния, основанный на несущей способности основания;  $U$  – показатель функциональности  $U \in [0; 1]$ ;  $D$  – приведенные (относительные) негативные последствия от снижения функциональности  $D \in [0; 1]$ .

рение энергосберегающих и экологически безопасных ТС и технологий; формирование оптимальной структуры (стимулирование обновления) парка подвижного состава разных видов транспорта за счёт управления процессами его пополнения и выбытия; нормирование удельных выбросов CO<sub>2</sub>, развитие немоторизованных видов транспорта; поддержание технического состояния ТС и ОТИ в нормативном состоянии; стимулирование потребителя к осуществлению выбора низкоуглеродных ТС и др.

Мероприятия II группы связаны с развитием энергоэффективного производства альтернативных топлив и ТС, способных на них работать, электрификации автомобильного транспорта, а также заправочной инфраструктуры.

Мероприятия III группы предусматривают управление спросом на транспортные услуги; формирование рациональной структуры транспортных сетей в городах и агломерациях; низкоуглеродную организацию перевозочного процесса при взаимном дополнении (но не конкуренции) разных видов транспорта (цифровые транспортно-логистические технологии, интеллектуальные транспортные системы и т.п.); формирование "умной" системы взимания дорожных сборов (по пройденному расстоянию, массе ТС, уровня их энергетической и экологической эффективности) и др.

Первоочередные меры по повышению энергоэффектив-

ности и сокращению выбросов ПГ, прежде всего автомобильным транспортом (на период до 2023 г.), установлены на основе баланса административных, экономических и смешанных методов государственного и рыночного регулирования и должны предусматривать: введение углеродноориентированного транспортного налога и норм удельных (на единицу пробега) выбросов CO<sub>2</sub> и расхода топлива ТС; перераспределение транспортной работы по перевозке грузов и пассажиров с автомобильного и воздушного на менее энергоёмкие виды транспорта (водный, железнодорожный, городской электрический, велосипедный).

В результате выполненных прогнозных оценок установлено, что реализация указанных выше мероприятий позволит по сравнению с 2015 г. сократить валовые выбросы ПГ транспортом на период до 2030 г. с 286 до 260–281 млн т CO<sub>2-экв</sub>. Наибольшее снижение валовых выбросов ПГ ожидается в период после 2025 г. за счет интенсивного замещения легковых и легких коммерческих ТС на нефтяном топливе электромобилями и гибридами, изменения транспортного поведения населения, развития общественного пассажирского транспорта и велосипедного движения, внедрения мер управления мобильностью, автономных ТС и т.д. Доля автомобильного транспорта в суммарных выбросах ПГ транспортом в 2030 г. составит 72,9–75,1 %.

При массовой электрификации автомобильного транспорта, увеличении использования электрической и тепловой энергии из внешних источников на стационарных объектах транспорта регулирование выбросов ПГ в транспортном секторе будет зависеть от интенсивности ввода новых генерируемых мощностей и объемов использования в энергетике атомной энергии и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). По оценкам МАДИ электротранспорту к 2030 г. потребуется 2,8–8,0 млрд кВт·ч электроэнергии при численности парка электромобилей 1,9–5,4 млн ед.

**Адаптация ОТИ к климатическим изменениям.** Были оценены риски в отношении свайного основания автомобильного моста, возникающие при повышении среднегодовой температуры воздуха на величину  $\Delta T_{ср} = +2$  °C в сочетании с повышением контрастности климата  $\Delta T_{ср} = +2$  °C (сценарий 3). Поперечное сечение сваи было принято равным 40×40 см, глубина погружения 6 м. Климатические условия эксплуатации соответствовали условиям г. Якутска. Результаты оценки климатических рисков, в том числе в случае использования СОУ (термостабилизаторов), полученные авторами по результатам имитационного моделирования климатических изменений, приведены в табл. 1.

Согласно данным табл. 1, даже при отсутствии СОУ уровень климатического риска (потери функциональности) данного ОТИ является небольшим, а при использовании термостабилизаторов еще и немного снижается (с 438 до 333 баллов). В этой связи целесообразность использования СОУ для объекта представляется неочевидной и должна уточняться с учетом затрат на их сооружение и вреда при отказе от их использования.

Такие же оценки были проведены и для других ОТИ, расположенных на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов — участков автомобильных и железных до-

рог в насыпи (автодорожный и железнодорожный профиль), взлетно-посадочных полос аэродромов (аэродромное покрытие), а также производственных ОТИ морских и речных портов, имеющих ленточные и столбчатые фундаменты.

С целью выявления территориально-обусловленных закономерностей, влияющих на уровень снижения климатических рисков при использовании СОУ, был рассмотрен 41 пункт в пределах криолитозоны России, по каждому из которых имеется достоверная статистика базового состояния климата, построенная по результатам многолетних инструментальных наблюдений. При этом базовое состояние климата соответствует точке наблюдений и характерно для некоторой территории в ее окрестностях.

Из результатов выполненного авторами имитационного моделирования следует, что при реализации сценария 1 для *свайных оснований* ОТИ, а также *автодорожного и железнодорожного профилей* риски прогнозируются небольшими и не требуют использования СОУ на всех рассмотренных типах грунтов. При этом можно отметить тенденцию к повышению эффективности СОУ для объектов территориальных групп, отличающихся более высокими температурами воздуха в течение среднестатистического года. Наиболее уязвимые к климатическим изменениям по сценарию 1 *ленточные и столбчатые фундаменты* могут быть достаточно эффективно защищены с помощью термостабилизаторов даже в песчаных маловлажных грунтах. Для всех рассмотренных территорий возможно существенное снижение климатического риска. При общей достаточно высокой эффективности СОУ они зависят от климатических условий на территории (прогнозируемое снижение риска составляет 24,3–87,3 %), что свидетельствует о необходимости рассмотрения различных конструктивных схем термо-

стабилизаторов с целью выбора наиболее эффективного.

Потепление климата, хотя и сопровождается несколько более высокими значениями риска, но также не требует его снижения с использованием СОУ для *автодорожного и железнодорожного профилей*. Прогнозируемая эффективность СОУ при реализации данного сценария несколько ниже, чем в случае повышения контрастности. Это объясняется более теплым зимним периодом и пониженной в этих условиях мощностью термостабилизаторов. Потепление климата существенно повышает риски в отношении *свайного основания*. По мере повышения среднегодовой температуры воздуха на территории увеличиваются значения климатических рисков и возможная эффективность использования СОУ. Вместе с тем в условиях пониженных температур воздуха эффективность использования СОУ существенно снижается (даже при высокой влажности грунта снижение риска не превышает 90 баллов, а для сухих песков — 25 баллов). *Ленточные и столбчатые фундаменты* и при реализации сценария 2 могут быть эффективно защищены с помощью СОУ, что также требует максимально точного соответствия конструкции термостабилизатора конкретным климатическим и грунтовым условиям. При соблюдении этого требования снижение риска может превысить 500 баллов. В противном случае эффективность СОУ может оказаться неоправданно низкой. Типичное снижение риска для данного вида объектов при использовании СОУ составляет 200–400 баллов. Результаты оценки прогноза климатических рисков для сценария 3 (сочетание потепления и повышения контрастности климата) приведены в табл. 2.

Данный сценарий является наиболее опасным для ОТИ всех типов. Установлено, что при реализации сценария 3 эффективность использования термо-

стабилизаторов для *автодорожного и железнодорожного профилей* зависит от уровня базового риска  $R_0$  (при отсутствии СОУ) и повышается по мере роста этого уровня. В условиях низкого базового риска ( $R_0 \leq 300$ ) возможная величина его снижения за счет использования СОУ не превышает -13 баллов (Сого-Хая); для среднего уровня риска (Келлог) снижение составляет -77 баллов; в климатических условиях высокотемпературной редкоостровной мерзлоты (Пялица) изменение риска  $R_1 - R_0$  составит -219 баллов. *Аэродромное покрытие* отличается несколько меньшими уровнями риска для базового климата, что обусловлено отсутствием дополнительного протаивания грунта по наклонным боковым поверхностям, характерным для автодорожного и железнодорожного профиля. Из данных табл. 2 видно, что при использовании термостабилизаторов прогнозируется сокращение величины риска при среднем уровне базового риска ( $R_0 \leq 600$ ) на -50–60 баллов, при высоком уровне базового риска ( $R_0 > 600$ ) до -214 баллов.

Максимальная эффективность использования СОУ прогнозируется в отношении *ленточных и столбчатых фундаментов*. При наличии грунтов высокой влажности (почвы Пв и Гв) возможно снижение климатических рисков на 786 баллов (Нагорный). Достаточно частым случаем является понижение риска более чем на 600 баллов (Среднеколымск, Чара и т.д.). В то же время сухие грунты существенно понижают эффективность использования термостабилизаторов. Ожидаемое по результатам моделирования снижение климатического риска для *свайного основания* несколько ниже, чем при двух ранее рассмотренных сценариях климатических изменений. В условиях повышения контрастности климата снижение рисков более чем на 40 % прогнозируется достаточно часто, при потеплении такая величина снижения прогнозировалась только в редких случаях.

**Таблица 2. Эффективность СОУ разных видов ОТИ для различных территорий и грунтов в условиях одновременного потепления и повышения контрастности климата (сценарий 3)**

**Table 2. Efficiency of SCD of different types of OTI for different territories and soils under conditions of simultaneous warming and increasing climate contrast (scenario 3)**

Пункт	Тип грунта	Климатические риски, балл			
		Без СОУ $R_0$	При использовании СОУ		
			Уровень риска $R_1$	Изменение	
			Балл	%	
Автодорожный и железнодорожный профиль					
Усть-Омчуг	Гн	396	360	-36	-9,1
Сого-Хая	Пн	156	143	-13	-8,3
Якутск	Гв	476	407	-69	-14,5
Нагорный	Пн	205	194	-11	-5,4
Чара	Гв	504	434	-70	-13,9
Уренгой	Гн	398	336	-62	-15,6
Келлог	Гв	495	418	-77	-15,6
Пялица	Гв	739	520	-219	-29,6
Аэродромное покрытие					
Усть-Омчуг	Гв	510	451	-59	-11,6
Уренгой	Гн	304	250	-54	-17,8
Пялица	Гв	602	388	-214	-35,5
Свайное основание					
Депутатский	Пн	437	417	-20	-4,6
	Пв	378	336	-42	-11,1
Сого-Хая	Пв	366	333	-33	-9,0
	Гв	344	262	-82	-23,8
Якутск	Пн	482	448	-34	-7,1
	Гн	442	384	-58	-13,1
Нижнеангарск	Пн	766	692	-74	-9,7
Терско-Орловский	Пн	879	613	-266	-30,3
	Гн	836	352	-484	-57,9
Ленточные и столбчатые фундаменты					
Среднеколымск	Пн	909	721	-188	-20,7
	Пв	690	147	-543	-78,7
	Гв	781	167	-614	-78,6
Сого-Хая	Пн	936	871	-65	-6,9
	Гв	766	175	-591	-77,2
Якутск	Пн	1000	1000	0	0,0
	Пв	882	364	-518	-58,7
Нагорный	Гн	934	754	-180	-19,3
	Гв	871	85	-786	-90,2
Чара	Пн	1000	974	-26	-2,6
	Гв	893	124	-769	-86,1
Ныда	Пв	826	65	-761	-92,1
	Гн	922	639	-283	-30,7
Келлог	Гн	888	807	-81	-9,1
	Гв	799	112	-687	-86,0

**Примечание.** Пн – песчаный низкой влажности; Пв – песчаный высокой влажности, Гн – глинистый низкой влажности; Гв – глинистый высокой влажности.

### Выводы

Валовые выбросы парникового газа от транспортного комплекса, влияющие на климатические изменения, в ближайшие 15 лет могут сократиться с 286 до 260–281 млн т  $CO_2$ -экв. Доля автомобильного транспорта в суммарных выбросах ПГ транспортным ком-

плексом при этом существенно не изменится и будет составлять 72,9–75,1 %.

Эффективность адаптации к климатическим изменениям ОТИ за счет использования термостабилизаторов, прогнозируемая на ближайшие 30 лет с учетом природно-климатических и грунтовых особенностей отдельных территорий криоли-

тозоны, оценивается следующим образом.

Эффективность адаптации автодорожного и железнодорожного профилей низкая или, в отдельных случаях, средняя. При этом величина ожидаемых климатических рисков для данного вида объектов также находится на относительно невысоком уровне и обычно не требует высокоэффективных мероприятий по снижению риска. Аэродромное покрытие также отличается низкой эффективностью, что сопровождается конструктивной невозможностью обеспечения свободного пространства в обоих горизонтальных направлениях при использовании выступающих из земли радиаторных секций термостабилизаторов. Средняя и высокая эффективность наблюдается для свайного основания мостов и иных сооружений и увеличивается с ростом длины погружаемой в грунт сваи. Ленточный или столбчатый фундамент имеет максимально высокую эффективность, особенно при расположении испарительной секции непосредственно в пределах грунтовой области под подошвой фундамента; но и при отсутствии такой возможности размещение термостабилизаторов вблизи границ этой области приводит к существенному снижению климатических рисков.

Комплекс мер по адаптации ОТИ к изменениям климата должен быть ориентирован на повышение способности транспортных систем адекватно реагировать на любые сценарии изменения климата. Нужно развивать информационно-коммуникативные технологии, обеспечивающие дистанционный мониторинг технического состояния ОТИ, чтобы повысить достоверность выполняемых по разработанной методике расчетов и своевременно внедрять требуемые меры по их адаптации к климатическим изменениям и в результате повышать живучесть транспортной системы, т.е. выполнять свои функции, несмотря на возможные сбои или отказы отдельных элементов.

## Литература

1. Трофименко Ю.В. Экологические проблемы при эксплуатации автомобильного транспорта. Экология и промышленность России. 2002. Апрель. С. 24–27.
2. Трофименко Ю.В. Актуальные проблемы инженерной экологии и обеспечения техносферной безопасности автотранспортного комплекса. Безопасность в техносфере. 2007. № 2. С. 46–54.
3. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Методика прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на сети автомобильных дорог. Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4. № 2. С. 73–82.
4. Трофименко Ю.В., Чижова В.С. Оценка загрязнения воздуха аэрозольными частицами размером менее 10 мкм от транспортных потоков на городских автомагистралях. Экология и промышленность России. 2012. № 9. С. 41–45.
5. Кальнер В.Д. Цифровая экономика и экологическая безопасность жизнедеятельности. Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 1. С. 62–67. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-62-67.
6. Trofimenko Yu., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. International Conference on Sustainable Cities. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 177 (2018) 012014. 2018. 13 p. DOI:10.1088/1755-1315/177/1/012014.
7. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2015 гг. М., 2017. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.meteorf.ru/upload/pdf\\_download/NIR-2017\\_v1\\_fin.pdf](http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/NIR-2017_v1_fin.pdf) (дата обращения 21.08.2018).
8. Хлебникова Е.И., Дашук Т.А., Салль И.А. Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс. Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2014. № 574. С. 125–178.
9. Aksenov V.I., Gevorkyan S.G., Doroshin V.V. Dependence of Strength and Physical Properties of Frozen Sands on Moisture Content. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. Vol. 54. № 6. P. 420–424.
10. Якубович И.А. Анализ норм проектирования объектов автотранспортной инфраструктуры на чувствительность результатов расчетов к прогнозируемым климатическим изменениям. Актуальные проблемы современной науки. 2017. № 1 (92). С. 208–213.
11. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Моделирование риска нарушения экологического состояния придорожных территорий криолитозоны России в условиях изменения климата. Экология промышленного производства. 2017. № 1. С. 41–47.
12. Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России. Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 2. С. 90–99.
13. Пасек В.В., Вербух Н.Ф., Пасков М.В., Палавошев И.Н., Андреев В.С. Стабилизация температурного режима насыпей в районах вечной мерзлоты. Путь и путевое хозяйство. 2015. № 10. С. 28–30.
14. Melnikov V.P., Anikin G.V., Ishkov A.A., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Maximum and minimum critical thermal loads constraining the operation of thermosyphons with horizontal evaporator tubes (HET). Earth's Cryosphere. 2017. Vol. XXI. № 3. P. 38–44.
15. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. Под ред. С. Игглестона, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара и К. Танабе. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. [Электронный ресурс]. ИГЕС, Япония. 2006. Т. 1–5. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (дата обращения: 21.08.2018).

## References

1. Trofimenko Yu.V. Ekologicheskie problemy pri ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2002. April'. S. 24–27.
2. Trofimenko Yu.V. Aktual'nye problemy inzhenernoi ekologii i obespecheniya tekhnosfernoi bezopasnosti avto-transportnogo kompleksa. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2007. № 2. S. 46–54.
3. Trofimenko Yu.V., Yakubovich A.N. Metodika prognozirovaniya riskov chrezvychainykh situatsii prirodno-go kharaktera na seti avtomobil'nykh dorog. Bezopasnost' v tekhnosfere. 2015. T. 4. № 2. S. 73–82.
4. Trofimenko Yu.V., Chizhova V.S. Otsenka zagryazneniya vozdukhа aerozol'nymi chastitsami razmerom menee 10 mkm ot transportnykh potokov na gorodskikh avtomagistralyakh. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2012. № 9. S. 41–45.
5. Kal'ner V.D. Tsifrovaya ekonomika i ekologicheskaya bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2018. T. 22. № 1. S. 62–67. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-62-67.
6. Trofimenko Yu., Komkov V., Donchenko V. Problems and prospects of sustainable low carbon development of transport in Russia. International Conference on Sustainable Cities. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 177 (2018) 012014. 2018. 13 p. DOI:10.1088/1755-1315/177/1/012014.
7. Natsional'nyi doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtсии poglotitelyami parnikovykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom, za 1990–2015 gg. M., 2017. [Elektronnyi resurs]. URL: [http://www.meteorf.ru/upload/pdf\\_download/NIR-2017\\_v1\\_fin.pdf](http://www.meteorf.ru/upload/pdf_download/NIR-2017_v1_fin.pdf) (data obrashcheniya 21.08.2018).
8. Khlebnikova E.I., Datsyuk T.A., Sall' I.A. Vozdeistvie izmenenii klimata na stroitel'stvo, nazemnyi transport, toplivno-energeticheskii kompleks. Trudy GGO im. A.I. Voeikova. 2014. № 574. S. 125–178.
9. Aksenov V.I., Gevorkyan S.G., Doroshin V.V. Dependence of Strength and Physical Properties of Frozen Sands on Moisture Content. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. Vol. 54. № 6. P. 420–424.
10. Yakubovich I.A. Analiz norm proektirovaniya ob'ektov avtotransportnoi infrastruktury na chuvstvitel'nost' rezul'tatov raschetov k prognoziruemykh klimaticheskim izmeneniyam. Aktual'nye problemy sovremennoi nauki. 2017. № 1 (92). S. 208–213.
11. Trofimenko Yu.V., Yakubovich A.N. Modelirovanie riska narusheniya ekologicheskogo sostoyaniya pridorozhnykh territorii kriolitozony Rossii v usloviyakh izmeneniya klimata. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2017. № 1. S. 41–47.
12. Anisimov O.A., Sherstyukov A.B. Otsenka roli prirodno-klimaticheskikh faktorov v izmeneniyakh kriolitozony Rossii. Kriosfera Zemli. 2016. T. XX. № 2. S. 90–99.
13. Passek V.V., Verbukh N.F., Paskov M.V., Palavoshev I.N., Andreev V.S. Stabilizatsiya temperaturnogo rezhima nasypei v raionakh vechnoi merzloty Put' i putevoe khozyaistvo. 2015. № 10. S. 28–30.
14. Melnikov V.P., Anikin G.V., Ishkov A.A., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Maximum and minimum critical thermal loads constraining the operation of thermosyphons with horizontal evaporator tubes (HET). Earth's Cryosphere. 2017. Vol. XXI. № 3. P. 38–44.
15. Rukovodyashchie printsipy natsional'nykh inventarizat-sii parnikovykh gazov MGEIK, 2006 g. Pod red. S. Igglestona, L. Buendia, K. Miva, T. Ngara i K. Tanabe. Programma MGEIK po natsional'nykh kadastram parnikovykh gazov. [Elektronnyi resurs]. IGES, Yaponiya. 2006. T. 1–5. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (data obrashcheniya: 21.08.2018).

Ю.В. Трофименко – д-р техн. наук, зав. кафедрой, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125319 Россия, г. Москва, Ленинградский проспект 64, e-mail: [ywtrofimenko@mail.ru](mailto:ywtrofimenko@mail.ru) • А.Н. Якубович – д-р техн. наук, профессор, e-mail: [54081@mail.ru](mailto:54081@mail.ru)

Yu.V. Trofimenko – Dr. Sci. (Eng.), Head of Department, Professor, Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), 125319 Russia, Moscow, Leningradsky Prospect 64, e-mail: [ywtrofimenko@mail.ru](mailto:ywtrofimenko@mail.ru) • A.N. Yakubovich – Dr. Sci. (Sci), Professor, e-mail: [54081@mail.ru](mailto:54081@mail.ru)