

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ АВТОДОРОЖНОЙ СЕТИ КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

А. Н. Якубович¹, Д. С. Пяткин², И. А. Якубович³

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

¹e-mail: 54081@mail.ru

²e-mail: cuh@mail.ru

³e-mail: yakubovich_irina@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования является количественная оценка ожидаемых негативных последствий от деградации вечномёрзлых грунтов в основании автодорожной сети с учетом местных климатических особенностей Якутска, Сусумана и Уренгоя.

Имитационное моделирование процессов распространения в грунте автодорожного профиля тепловой энергии, доставляемой совместно как окружающим воздухом (конвективный теплообмен), так и солнечной радиацией в приземном слое (нагрев излучением). Величина климатических рисков оценивается на основе осадки грунта в основании автодорожной сети, вызываемой дополнительным оттаиванием под влиянием глобального потепления климата.

В ходе исследования получены новые данные о состоянии дорожной сети как важнейшего элемента региональной автотранспортной системы в условиях изменения климата. Прогнозируемая величина дополнительной осадки грунта в основании автодорог при потеплении до 2 градусов, определяемая без учета поступающей в грунт солнечной радиации, составляет: для сухих песчаных грунтов 0,7–0,9 см, для влажных глинистых грунтов 2,2–2,6 см. При учете влияния солнечной радиации прогнозируемая осадка возрастает: в песчаном грунте до 1,6–1,8 см, в глинистом грунте до 4,7–5,5 см. Поступающая в грунт солнечная радиация также приводит к явно выраженной асимметрии осадки в пределах автодорожного профиля, которая составляет, в разных точках профиля, от 23% до 30%. Прогнозируемые риски нарушения функциональности автодорожной сети, расположенной на глинистых вечномёрзлых грунтах, по 1000-балльной шкале составляют 450 баллов для климатических условий Сусумана и Якутска, и 400 баллов для Уренгоя.

Для всех трех рассмотренных территорий влияние солнечной радиации на величину осадок автодорожного профиля является значимым, по своему влиянию сопоставимым с эффектом от повышения температуры приземного воздуха на величину 2 градусов. Учет эффекта поступления солнечной радиации в грунт приводит к существенному повышению рисков, ожидаемых в результате потепления климата, и переводит их с низкого уровня на средний уровень.

Ключевые слова: автодорожная сеть, криолитозона, изменение климата, моделирование, транспортная система.

Для цитирования: Якубович А. Н., Пяткин Д. С., Якубович И. А. Моделирование влияния местных климатических особенностей на функциональность автодорожной сети криолитозоны в условиях глобального потепления // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 1. – С. 131–138. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-1-131.

MODELING OF THE INFLUENCE OF LOCAL CLIMATIC FEATURES ON THE FUNCTIONALITY OF THE CRYOLITHOZONE ROAD NETWORK IN THE CONDITIONS OF GLOBAL WARMING

A. N. Yakubovich¹, D. S. Pyatkin², I. A. Yakubovich³

Moscow automobile and road University (MADI), Moscow, Russia

¹e-mail: 54081@mail.ru

²e-mail: cuh@mail.ru

³e-mail: yakubovich_irina@mail.ru

Abstract. The road network of the cryolithozone of Russia, operated in conditions of ongoing climate change.

To quantify the expected negative consequences of the degradation of permafrost soils at the base of the road network, taking into account the local climatic characteristics of Yakutsk, Susuman and Urengoy.

Simulation modeling of the processes of propagation in the soil of the road profile of thermal energy delivered jointly by both ambient air (convective heat exchange) and solar radiation in the surface layer (radiation heating). The magnitude of climate risks is estimated on the basis of soil precipitation at the base of the road network caused by additional thawing under the influence of global warming

New data on the state of the road network as the most important element of the regional road transport system in the conditions of climate change have been obtained. The predicted value of additional soil precipitation at the base of roads with warming up to 2 degrees, determined without taking into account the incoming solar radiation into the ground, is: for dry sandy soils 0.7–0.9 cm, for wet clay soils 2.2–2.6 cm. Taking into account the influence of solar radiation, the predicted precipitation increases: in sandy soil up to 1.6–1.8 cm, in clay soil up to 4.7–5.5 cm. Solar radiation entering the ground also leads to a pronounced asymmetry of precipitation within the road profile, which is, at different points of the profile, from 23% to 30%. The predicted risks of disruption of the functionality of the road network located on clay permafrost soils on a 1000-point scale are 450 points for the climatic conditions of Susuman and Yakutsk, and 400 points for Urengoy.

For all three territories considered, the influence of solar radiation on the value of road profile sediment is significant, in its influence comparable to the effect of an increase in surface air temperature by a value of 2 degrees. Taking into account the effect of solar radiation entering the ground leads to a significant increase in the risks expected as a result of climate warming, and transfers them from a low level to an average level.

Keywords: road network, cryolithozone, climate change, modeling, transport system.

Cite as: Yakubovich, A. N., Pyatkin, D. S., Yakubovich, I. A. (2020) [Modeling the influence of local climatic features on the functionality of the cryolithozone road network in the conditions of global warming]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol.1, pp.131–138. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-1-131.

Введение

Автомобильный транспорт играет важнейшую роль в социально-экономическом развитии северных территорий России [8]. Крайне ограниченное использование железнодорожного транспорта, обусловленное повсеместным распространением вечномерзлых грунтов на территориях северных регионов, в сочетании с повышенной стоимостью авиаперевозок, делает автомобильный транспорт основным средством доставки грузов от морского побережья и речных артерий на континентальные территории [10]. Это в полной мере относится и к пассажирским, в первую очередь внутри региональным, перевозкам [4]. Соответственно, к автодорожной сети северных территорий предъявляется требование гарантированного сохранения ее функциональной пригодности при любых условиях эксплуатации – как техногенных, так и природно-климатических.

В современных условиях одним из значимых факторов, оказывающих несомненное долгосрочное влияние на экономическое развитие северных территорий, является глобальное изменение климата [1, 12]. Несмотря на неравномерность темпов климатических изменений в отдельных географических регионах, факт продолжающегося потепления установлен с очень высокой достоверностью [3]. Соответственно, появляется насущная необходимость планирования и осуществления инженерно-технических мероприятий, направленных на противодействие климатическим угрозам и рискам, в том числе при эксплуатации сооружений автотранспортной инфраструктуры.

Повышенная уязвимость инфраструктурных объектов криолитозоны к наблюдаемым климатическим изменениям в первую очередь обусловлена процессами деградации вечномерзлых грунтов, в результате чего существенно снижается несущая способность оснований зданий и сооружений, появляются массовые сверхнормативные осадки грунта, приводящие к затруднению или полной невозможности дальнейшей эксплуатации этих объектов [6]. Ожидаемые риски снижения функциональности автодорожной сети криолитозоны количественно оценены в [11, 14] и признаны низкими или средними в зависимости от климатических особенностей конкретной территории. При этом снижение эксплуатационных качеств автодорожного покрытия приводит не только к снижению интенсивности транспортных потоков, но и к существенному ухудшению эксплуатационной пригодности автотранспортных средств [5].

Основной причиной систематического повышения температуры воздуха в приземном слое атмосферы является изменение динамики поступления солнечной радиации на земную поверхность [2]. В результате на значительных территориях формируются тепловые аномалии, вызывающие ускоренную деградацию вечномерзлых грунтов за счет конвективного обмена теплом между воздухом и поверхностным слоем почвы, с дальнейшим проникновением дополнительного тепла к мерзлым слоям. В то же время, поступление тепла в грунт возможно и за счет прямой солнечной радиации. Несмотря на меньшие, по сравнению с конвективным обменом, количества дополнительной тепловой энергии, на

ограниченных участках влияние прямой солнечной радиации может оказаться значительным. Применительно к оценке самовосстановительного потенциала северных территорий, значимое влияние динамики поступления на территорию прямой солнечной радиации показано в [15].

Таким образом, несомненный интерес представляет прогнозирование эксплуатационного состояния дорожной сети в криолитозоне с учетом как количества поступающей на территорию солнечной радиации, так и особенностей расположения (пространственного ориентирования) на ней отдельных дорожных участков. При этом одним из важных вопросов является выбор параметров состояния климата, которые позволяют достаточно полно охарактеризовать процессы оттаивания грунта и связанной с ними деградации вечной мерзлоты. Эти параметры должны быть легкодоступны для инструментальных измерений, и по ним должны быть накоплены достаточно обширные массивы статистических данных. Выявление и исследование параметров, наиболее значимо влияющих на природно-климатические процессы, показано, в частности, в [9]. Кроме того, с учетом большой протяженности автодорожной сети криолитозоны России и многочисленных территориально-обусловленных климатических особенностей, прогнозирование эксплуатационного состояния целесообразно осу-

ществлять с использованием геоинформационных технологий и геомоделирования [7, 13].

Целью настоящего исследования являлась количественная оценка рисков нарушения функциональности автодорожной сети как следствия климатических изменений на территории криолитозоны России. Поскольку автотранспорт является важнейшим (а в ряде случаев – безальтернативным) средством перемещения людей и грузов по континентальной части северных регионов, от состояния автодорожной сети в значительной степени зависит и эффективность функционирования региональных автотранспортных систем.

Методы исследования

Прогнозирование эксплуатационного состояния автодорожной сети выполнялось на основе результатов имитационного моделирования, учитывавшего совместное воздействие на материал дорожного профиля атмосферного воздуха (конвективная передача тепла) и солнечной радиации (нагрев излучением). Форма и геометрические размеры грунтового массива (включающего профиль автодороги и его основание), в пределах которого выполнялось моделирование теплопереноса, определение величины сверхнормативного оттаивания вечномерзлого слоя и соответствующей осадки оттаявшего грунта, показаны на рисунке 1.

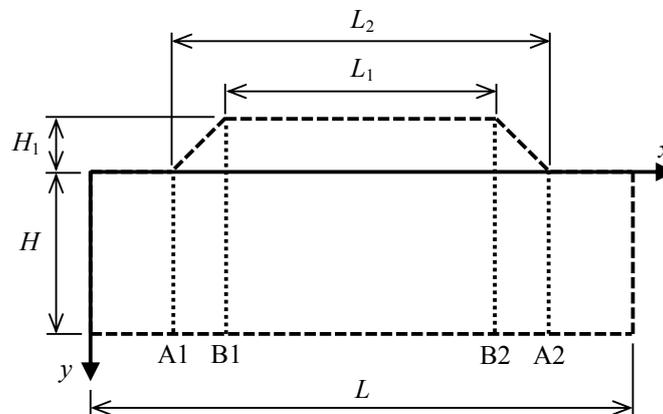


Рисунок 1. Схема моделируемого грунтового массива; A1, B1, B2, A2 – вертикальные профили

Конвективный теплообмен на границе грунтового массива и атмосферного воздуха описывался эмпирической зависимостью Мэцумуры, в которой Q_c – тепловая энергия в Дж:

$$Q_c = 18v^{0,578} (T_a - T_g) S_g \Delta t, \quad (1)$$

где

v – средняя скорость ветра на протяжении периода Δt , м/с;
 T_g и T_a – температура грунта и воздуха соответственно, °С;

S_g – площадь верхнего слоя грунта, соприкасающаяся с воздухом, м²;

Δt – интервал моделирования, на протяжении которого все остальные параметры считались неизменными, с.

Поступление в грунтовой массив дополнительного тепла Q_r (Дж) за счет прямой солнечной радиации:

$$Q_r = I_0^* e^{-k(M,h)} S_g \cos(\alpha) c_r \Delta t \geq 0, \quad (2)$$

где

$I_0^* = 1,37 \text{ кВт/м}^2$ – значение солнечной постоянной (поток солнечной энергии на верхней границе атмосферы);

$k(\mathbf{M}, h)$ – коэффициент ослабления солнечной радиации при ее прохождении через атмосферу Земли, который зависит от текущего состояния атмосферы (характеризуемого множеством параметров \mathbf{M}) и от высоты Солнца h ;

α – угол между нормалью к поверхности грунта и направлением на Солнце;

$c_r < 1$ – коэффициент поглощения для верхнего слоя грунтового массива.

Входные параметры модели могут быть разделены на три группы. Первая группа параметров (включая температуру воздуха T_a и скорость ветра v) образует массив \mathbf{M} и характеризует состояние атмосферы в течение среднестатистического года. Значения в массиве \mathbf{M} , определенные по результатам многолетних инструментальных наблюдений за климатом, служат для описания базового климата. Климатические изменения учитываются с помощью соответствующих изменений в \mathbf{M} (например, повышение температуры воздуха в течение всего года на постоянную величину). Вторая группа описывает годовое перемещение Солнца по отношению к моделируемому грунтовому массиву (привязанному к определенной точке земной поверхности); параметрами, изменяющимися со временем, здесь являются высота Солнца h и его азимут A . Третья группа характеризует геометрические размеры грунтового массива, показанные на рисунке 1, а также теплофизические параметры грунта.

С использованием (1) и (2) по отдельным периодам среднестатистического года определялось суммарное количество тепловой энергии $Q = Q_c + Q_r$. Получаемые значения $Q < 0$ соответствовали отдаче тепла грунтом, а $Q > 0$ – поступлению тепла в грунт. Моделирование теплопереноса внутри грунтового массива осуществлялось в среде программирования C# на основе закона Фурье; численная реализация процедуры моделирования, учитывающая геометрическую форму грунтового массива и динамику изменения внешних параметров, более детально показана в [11, 14].

По результатам моделирования выявлялась дополнительная осадка грунта δ_{melt} (максимальная в течение среднестатистического года), обусловленная прогнозируемыми климатическими изменениями на определенной территории, и учитывающая как местные климатические особенности, так и индивидуальные характеристики автодорожного сегмента:

$$\delta_{\text{melt}} = \delta_y \left(\sum_{T_{g,m} \geq T_{\text{bf}}} e_m - \sum_{T_{g,0} \geq T_{\text{bf}}} e_0 \right), \quad (3)$$

где

δ_y – пространственное разрешение модели по оси y (высота прямоугольного элемента, с помощью которых моделируется грунтовый массив), м;

T_{bf} – температура замерзания грунта, °С; $T_{g,m}$ и e_m – температура (°С) и относительная осадка при оттаивании слоя грунта высотой δ_y для измененного климата;

$T_{g,0}$ и e_0 – то же, для базового климата.

Величина дополнительной осадки δ_{melt} служила показателем прогнозируемого ухудшения эксплуатационного состояния автодорожного сегмента, ожидаемого в результате изменения климата на рассматриваемой территории криолитозоны.

Результаты прогнозирования и их обсуждение

Численное моделирование осадки автодорожного профиля было выполнено применительно к климатическим условиям Якутска, Сусумана и Уренгоя. Первые две территории характеризуются низкотемпературной, преимущественно сплошной вечной мерзлотой в основании автомобильных дорог; в окрестностях же Уренгоя имеет место прерывистая и массивно-островная вечная мерзлота. В то же время географическая широта, оказывающая влияние на продолжительность периода поступления солнечной радиации, для Уренгоя больше (65,97°) по сравнению с Сусуманом (62,78°) и Якутском (62,03°).

Перечень использованных при моделировании параметров базового климата, усредненных за период 1961–1990 гг., для всех трех рассмотренных территорий включал в себя: температуру приземного воздуха; влажность и давление воздуха на поверхности Земли; среднее количество верхней и нижней облачности (баллов); среднемесячные количества дней с туманами и продолжительность туманов. Измененный климат описывался увеличением температуры воздуха на 2 °С – одинаково по всем дням среднестатистического года.

Результаты моделирования показаны на рис. 2. Несмотря на то, что на всех рассмотренных территориях глубина дополнительного оттаивания при потеплении на +2 °С для сухого песчаного грунта прогнозируется выше, чем для влажного глинистого (для Якутска, например, эти показатели равны 26 см и 19 см соответственно), величина осадки глинистого грунта во всех случаях больше. Это объясняется различной деформативностью грунтов при их оттаивании. В случаях, когда влияние поступающей в грунт солнечной радиации не учитывается, линии максимального оттаивания и соответствующие им осадки дорожного профиля симметричны относительно центральной оси профиля (кривые 1 и 3 на рис. 2). При учете солнечной радиации на-

чинает проявляться неравномерность инсоляции для двух откосов профиля, которая хорошо видна на рис. 2 (кривые 2 и 4); степень этой неравномерности зависит от ориентации дорожного сегмента на местности. При принятой в расчетах ориентации

автодороги в направлении на юго-восток, разница в осадке глинистого грунта на верхних точках откоса (вертикальные профили В1 и В2) составила 23–25%, на нижних точках (вертикальные профили А1 и А2) – 27–30%.

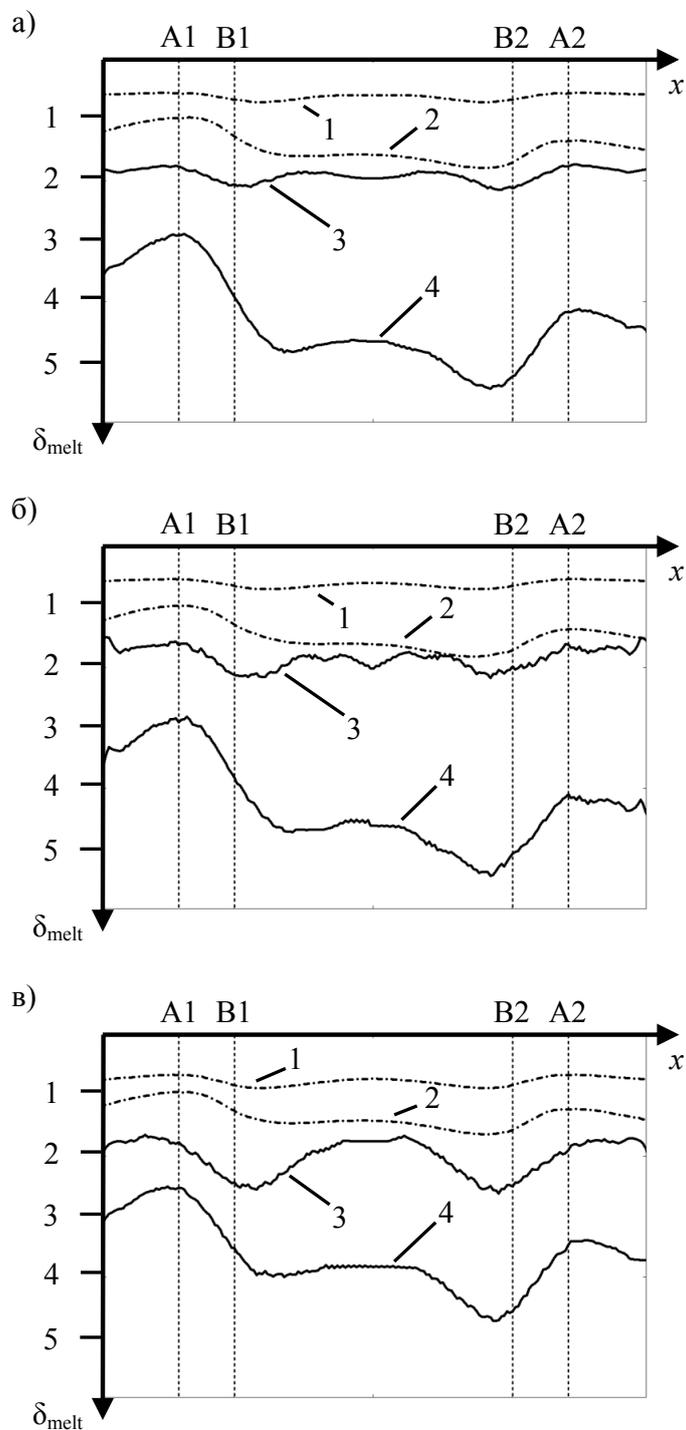


Рисунок 2. Прогнозируемая величина осадки автодорожного профиля (см) при повышении температуры воздуха на +2 °С: а) – Сусуман, б) – Якутск, в) – Уренгой; 1 – сухой песчаный грунт, прямая солнечная радиация не учитывается, 2 – тот же грунт, с учетом солнечной радиации, 3, 4 – влагонасыщенный глинистый грунт без учета солнечной радиации и с ее учетом соответственно

В работах [11, 14], когда климатические риски не учитывали влияния поступающей в грунт солнечной радиации, для различных территорий криолитозоны были получены оценки риска в диапазоне 150–400 баллов по 1000-балльной шкале; максимально возможный риск при этом соответствовал дополнительной осадке автодорожного профиля в размере 10 см. На рис. 2 прогнозируемая величина риска может быть в первом приближении оценена по кривой 3, и составляет около 200 баллов для климатических условий Якутска и Сусумана, и около 250 баллов для Уренгоя. При учете дополнительного влияния солнечной радиации климатические риски существенно возрастают (рис. 2, кривая 4): до 450 баллов для автодорожной сети Якутска и Сусумана, и до 400 баллов – для Уренгоя.

Переход ожидаемых климатических рисков с низкого уровня (соответствующего диапазону 101–300 баллов) на средний уровень (диапазон 301–600 баллов) [14] подтверждает необходимость учета динамики солнечной радиации при прогнозировании эксплуатационного состояния автодорожной сети криолитозоны в условиях глобального изменения климата. При этом в зависимости от расположения автодороги на территории, имеет место асимметрия в величине осадок на двух сторонах автодорожного профиля, что, несомненно, увеличивает величину климатических рисков; определение наиболее опасного расположения дорожного сегмента требует дальнейших исследований. Также дополнительно должно быть рассмотрено возможное изменение состояния атмосферы (в частности, верхней и нижней облачности), определяющего ко-

личество приходящей на земную поверхность солнечной радиации и тем самым влияющего на климатические риски.

Выводы

1. Влияние поступающей в грунт солнечной радиации на величину его оттаивания и связанных с этим дополнительных осадков является значительным. Учет этого фактора способен существенно увеличивать достоверность результатов прогнозирования климатических рисков для автодорожной сети криолитозоны России.

2. Величина климатических рисков для автодорожной сети России, расположенной на территории сплошной и массивно-островной вечной мерзлоты, составляет (при величине ожидаемого потепления до +2 °С) 400–450 баллов по 1000-балльной шкале, что позволяет качественно оценить эти риски как средние. При таком уровне климатического риска необходимо систематическое наблюдение за текущим состоянием автодорожной сети с целью своевременного обнаружения и устранения снижения эксплуатационного качества автодорожного полотна под влиянием деградации вечномерзлых грунтов в основании автодороги.

3. Для двух откосов автодорожного профиля динамика поступления на них солнечной радиации различается, и зависит от расположения дорожного сегмента на территории. В результате возрастает неравномерность как глубины оттаивания грунта в основании автодороги, так и величины его осадки, что может приводить к возрастанию климатических рисков для автодорожного профиля в целом.

Литература

1. Бабурин В. Л., Бадина С. В., Горячко М. Д., Земцов С. П., Колтерманн К. П. Оценка уязвимости социально-экономического развития арктической территории России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2016. – № 6. – С. 71–77.
2. Бикташ Л. З. Влияние потока полной солнечной радиации на климат Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – № 3. – С. 393–399.
3. Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В., Смирнов В. Д. Географические и сезонные особенности современного глобального потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – № 2. – С. 41–62.
4. Дрейцен М. А. Современное состояние и перспективы развития автомобильного пассажирского транспорта республики Саха (Якутия) // Грузовик. – 2018. – № 2. – С. 37–41.
5. Левин А. И., Винокуров Г. Г. Влияние статистических характеристик профиля дороги на колебания подвески автомобильной техники Севера // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2018. – №5. – С. 54–64.
6. Лоскин М. И., Готовцев С. П., Сыромятников И. И. Проблемы гидротехнических сооружений, построенных на мерзлых грунтах в условиях потепления климата в Центральной Якутии // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 3. – С. 14–18.
7. Полищук Ю. М., Полищук В. Ю. Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения размеров термокарстовых озер на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2016. – № 2. – С. 32–40.
8. Серова В. А. Проблемы транспортной обеспеченности севера: социальный аспект // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2010. – № 32. – С. 66–71.
9. Солдатенко С. А., Юсупов Р. М. О выборе управляющих параметров при моделировании целе-

направленной модификации природно-климатических процессов // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 1. – С. 153–180.

10. Тебекин А. В. Развитие логистики в северных и арктических регионах // Журнал исследований по управлению. – 2018. – № 10. – С. 55–63.

11. 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.

12. 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 гидрогеология. – 2018. – № 6. – С. 5–19.

13. Якубович А. Н., Якубович И. А. Использование геоинформационных технологий при анализе и прогнозировании экологического состояния территорий дорожной сети // В мире научных открытий. – 2015. – № 6. – С. 52–63.

14. Якубович А. Н., Трофименко Ю. В., Якубович И. А. Моделирование и оценка природных и техногенных рисков в автотранспортном комплексе: монография. – М.: Изд-во МАДИ, 2018. – 232 с.

15. Якубович И. А., Якубович А. Н. Оценка экологического вреда растительным комплексам Магаданской области при формировании сети временных автодорог // Автотранспортное предприятие. – 2012. – № 3. – С. 49–52.

References

1. Baburin, V. L., Badina, S. V., Goryachko, M. D., Zemcov, S. P., Koltermann, K. P. (2016) [Assessment of the vulnerability of socio-economic development of the Arctic territory of Russia]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography]. Vol. 6, pp. 71–75. (In Russ.).

2. Biktash, L. Z. (2019) [Effect of total solar radiation flux on Earth's climate]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. Vol. 3, pp. 393–399. (In Russ.).

3. Gruza, G. V., Ran'kova, E. Ya., Rocheva, E. V., Smirnov, V. D. (2015) [Geographical and seasonal features of modern global warming]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and applied climatology]. Vol. 2, pp. 41–62. (In Russ.).

4. Drejcen, M. A. (2018) [Current state and prospects of development of automobile passenger transport of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Gruzovik* [Truck]. Vol. 2, pp. 37–41. (In Russ.).

5. Levin, A. I., Vinokurov, G. G. (2018) [Influence of statistical characteristics of a road profile on fluctuations of a suspension bracket of automobile equipment of the North]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Bulletin of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov]. Vol. 5, pp. 54–64. (In Russ.).

6. Loskin, M. I., Gotovcev, S. P., Syromyatnikov, I. I. (2018) [Problems of hydraulic structures built on frozen soils in the conditions of climate warming in Central Yakutia]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic engineering]. Vol. 3, pp. 14–18. (In Russ.).

7. Polishchuk, Yu. M., Polishchuk, V. Yu. (2016) [Use of geomitational modeling to predict changes in the size of thermokarst lakes in the North of Western Siberia]. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere]. Vol. 2, pp. 32–40. (In Russ.).

8. Serova, V. A. (2010) [Problems of transport security of the North: social aspect]. *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'* [National interests: priorities and security]. Vol. 32, pp. 66–71. (In Russ.).

9. Soldatenko, S. A., Yusupov, R. M. (2016) [On the choice of control parameters in modeling purposeful modification of natural and climatic processes]. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings SPIIA RAS]. Vol. 1, pp. 153–180. (In Russ.).

10. Tebekin, A. V. (2018) [Logistics development in the Northern and Arctic regions]. *ZHurnal issledovaniy po upravleniyu* [Journal of management studies]. Vol. 10, pp. 55–63. (In Russ.).

11. Trofimenko, Yu. V., Yakubovich, A. N. (2016) [Methodology for assessing the risk of loss of functionality of roads in the territories of permafrost distribution due to projected climate changes]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the technosphere]. Vol. 5, pp. 27–37. (In Russ.).

12. 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.).

13. Yakubovich, A. N., Yakubovich, I. A. (2015) [The use of geoinformation technologies in the analysis and forecasting of the ecological state of the territories of the road network]. *V mire nauchnykh otkrytij* [In the world of scientific discovery]. Vol. 6, pp. 52–63. (In Russ.).

14. Yakubovich, A. N., Trofimenko, Yu. V., Yakubovich, I. A. (2018) *Modelirovanie i ocenka prirodnyh i tekhnogennyh riskov v avtotransportnom komplekse* [Modeling and assessment of natural and man-made risks in the transport sector]. Moscow: MADI Publishers, 232 p. (In Russ.).

15. Yakubovich, I. A., Yakubovich, A. N. (2012) [Assessment of ecological harm to plant complexes of Magadan region in the formation of a network of temporary roads]. *Avtotransportnoe predpriyatie* [Motor transport enterprise]. Vol. 3, pp. 49–52. (In Russ.).

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

Пяткин Дмитрий Сергеевич, аспирант, направление подготовки 05.06.01. Науки о Земле, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

ORCID ID: 0000-0002-1384-6561

e-mail: cuh@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 25.11.2019; принята в печать 22.01.2020.

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

Dmitry Sergeevich Pyatkin, post-graduate student, training direction 05.06.01. Earth Sciences, Moscow automobile and road University (MADI), Moscow, Russia

ORCID ID: 0000-0002-1384-6561

e-mail: cuh@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: 25.11.2019.

Accepted for publication: 22.01.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.