
ТОЧКА
ЗРЕНИЯ

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕГРАДАЦИИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА ДЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

© 2019 г. Б.Н. Порфирьев^{1,*}, Д.О. Елисеев^{2,3,**}, Д.А. Стрелецкий^{4,5,***}

¹Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

²Российский новый университет, Москва, Россия

³Сочинский научно-исследовательский центр РАН, Сочи, Россия

⁴Университет Джорджа Вашингтона, Вашингтон, США

⁵Институт криосферы земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

*E-mail: b_porfiriev@mail.ru; **E-mail: elisd@mail.ru; ***E-mail: strelets@gwu.edu

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

Поступила после доработки 04.06.2019 г.

Принята к публикации 24.06.2019 г.

Авторы рассматривают три модельных сценария изменения устойчивости дорожной инфраструктуры под влиянием протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов в девяти регионах российской Арктики вследствие глобального изменения климата. Для экономической оценки последствий климатических изменений в этих регионах до середины текущего века в качестве физико-географической базы приняты модельные оценки мерзлотных условий, выполненные по шести климатическим моделям, отражающим самый негативный (сценарий RCP8.5) из вариантов прогноза глобальных изменений климата ИРСС как наиболее соответствующий условиям российской Арктики. В качестве базы прогнозов развития дорожной инфраструктуры выступают данные Транспортной стратегии РФ до 2035 г. с уточнениями авторов. Показано, что при инерционном (консервативном) сценарии развития дорожной инфраструктуры в 2020–2050 гг. капитальные затраты на поддержание её устойчивости и снижение рисков разрушения под влиянием протаивания и деградации вечной мерзлоты составят в среднем не менее 14 млрд руб. в год, при умеренном и модернизационном сценариях — превысят 21 и 28 млрд руб. соответственно. Максимальные показатели будут характерны для Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Чукотского АО. Реализация модернизационного сценария потребует пересмотра существующих стандартов, технологий и всей экономики дорожной инфраструктуры и капитального строительства в пользу развития инновационных стандартов и технологий строительства, а также совершенствования предложенных методологии и методики оценки затрат на эти цели.

Ключевые слова: российская Арктика, регионы, вечная мерзлота, изменение климата, протаивание, деградация, дорожная инфраструктура, инвестиции, риски, сценарии развития.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-587389121228-1239>



ПОРФИРЬЕВ Борис Николаевич — академик РАН, директор ИНП РАН. ЕЛИСЕЕВ Дмитрий Олегович — кандидат экономических наук, начальник научно-исследовательского центра РосНОУ, старший научный сотрудник СНИЦ РАН. СТРЕЛЕЦКИЙ Дмитрий Андреевич — PhD, профессор Географического факультета Университета Дж. Вашингтона.

Глобальные климатические изменения сильнее всего проявляются в северных широтах, особенно в арктических регионах России. Исследования последнего десятилетия показали, что интенсивность климатических процессов в российской части Арктики возрастает и формирует неопределённость и риски для хозяйственной деятельности [1]. Так, рост среднегодовой температуры приземного воздуха только за 1980–2012 гг. на 0,5–2,5°C [2] в значительной мере обусловил сокращение годового минимума площади льда в Северном Ледовитом океане (до рекордного значения 3,39 млн км² в 2012 г.) и масштабное протаивание и деградацию многолетнемерзлых грунтов на суше [3, 4]. Последнее в свою очередь стало причиной снижения устойчивости этих грунтов [5–9] и роста количества аварийных ситуаций на хозяйственных объектах [10–11]¹. За последние десятилетия увеличилось число разрушенных зданий и сооружений, расположенных на вечной мерзлоте [5]. По некоторым оценкам, из-за протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов на нефтяных месторождениях Западной Сибири в среднем происходит около 7400 аварий в год, в том числе порядка 1900 – в Ханты-Мансийском АО.

Несмотря на серьёзность проблемы для хозяйственного комплекса российской Арктики и страны в целом (что обусловлено, с одной стороны, распространённостью вечной мерзлоты в России – около 2/3 территории страны; с другой – значительным вкладом рассматриваемого макрорегиона в национальную экономику, превышающим 13% ВВП и 40% экспорта), экономических оценок последствий деградации вечномёрзлых грунтов явно недостаточно. Имеются либо немногочисленные макроэкономические оценки (согласно одной из них, среднегодовой многолетний ущерб от деградации вечной мерзлоты составляет около 150 млрд руб. [12], или 0,16% ВВП), либо оценки затрат на снижение такого ущерба для отдельных хозяйственных объектов, например, трубопроводов (по одной из оценок, на поддержание их работоспособности и ликвидацию механических деформаций, связанных с нарушением состояния вечномёрзлых грунтов, ежегодно тратится до 55 млрд руб. [13]), либо оценки

стоимости отдельных основных фондов в зонах криогенного риска [14].

Очевидно, необходимы более детализированные оценки актуального и ожидаемого ущерба от протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов для конкретных территорий, производственных и инфраструктурных комплексов. Особой значимостью для российской экономики и одновременно уязвимостью к указанным последствиям изменения климата отличается автотранспортная (дорожная) инфраструктура, которая включает разветвлённую сеть автомобильных дорог и искусственных сооружений (мосты, эстакады, туннели и т. п.). В настоящей статье предпринята попытка дать экономическую оценку последствий протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов для устойчивости дорожной инфраструктуры при различных перспективных оценках изменения климата.

Роль автотранспорта и дорожной инфраструктуры в экономике территорий, расположенных в зоне вечной мерзлоты. В зоне вечной мерзлоты расположены 28 регионов России, занимающих около 65% её территории, при этом распространение вечной мерзлоты крайне неравномерно. В европейской части многолетнемерзлые грунты распространены в Мурманской области, Ненецком АО, Республике Коми, а также фрагментарно в Пермском крае и Свердловской области. За Уральскими горами в зону вечной мерзлоты попадают Ямало-Ненецкий АО, Ханты-Мансийский АО, Красноярский край, Республика Саха (Якутия), Магаданская область, Камчатский край, Чукотский АО и частично республики Бурятия и Тыва, Забайкальский и Приморский края, Амурская, Иркутская и Сахалинская области. Однако только в девяти регионах российского Севера вечная мерзлота занимает значительную часть площади хозяйственно освоенной территории (Республика Коми, Якутия, Ненецкий, Ямало-Ненецкий, Ханты-Мансийский, Чукотский АО, Красноярский край, Магаданская область, Камчатский край), в остальных регионах она представлена фрагментарно². В связи с этим вопросы экономической оценки послед-

¹ Несущая способность вечномёрзлых грунтов, обеспечивающая устойчивость зданий и сооружений, зависит прежде всего от температурных и механических характеристик грунта. Поэтому строительство в зоне вечной мерзлоты ведётся с учётом как геологических, так и климатических и физико-географических факторов. Рост температуры в зоне вечной мерзлоты приводит к протаиванию и деградации вечномёрзлых грунтов, их неравномерной просадке и деформациям, что в свою очередь снижает устойчивость построенных на них инженерных конструкций.

² Согласно методологии Международной ассоциации мерзловедения, по площади распространения выделяются следующие типы вечной мерзлоты: сплошная (90–100% охвата территории), прерывистая (50–90%), массивно-островная (10–50%), спорадическая, или островная (менее 10%); по льдистости пород – высокая, средняя и низкая. Так, в Мурманской области, на Среднем Урале (Пермский край, Свердловская область), в Южной Сибири (Иркутская область, Алтайский край, Республика Тыва, Кемеровская область) и на Дальнем Востоке (Амурская область, Сахалин) вечная мерзлота, как правило, либо расположена в горных труднодоступных районах, либо носит очаговый характер, не представляя большого риска для хозяйственной деятельности.



Распространённость многолетнемёрзлых пород (ММП) по территории регионов России

ствий протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов будут рассматриваться применительно именно к указанным выше девяти регионам (рис.).

В экономике перечисленных регионов доминирует добывающая промышленность: в совокупном валовом региональном продукте (ВРП), величина которого в 2017 г. превысила 10 трлн руб., то есть 10,91% ВВП страны, на добычу сырья и полезных ископаемых приходится 44%. Большинство полезных ископаемых вывозится за пределы территорий добычи, в том числе за рубеж (в первую очередь нефть, газ, различные металлы, уголь, алмазы). В то же время добыча полезных ископаемых требует массового завоза необходимых материалов, машин и оборудования, а также рабочей силы (вахтовиков). В связи

с этим трудно переоценить значимость транспортной системы, вклад которой в совокупный ВРП составляет около 7%. Система включает подсистемы железнодорожного, автомобильного, авиационного, водного и трубопроводного транспорта. Среди них ведущая роль принадлежит автотранспорту, на который приходится 69% региональных грузопотоков (за исключением трубопроводного) (табл. 1). Отсюда понятна стратегическая значимость развитости сети и качественного состояния автодорожной инфраструктуры для экономики рассматриваемых регионов российского Севера. Протяжённость автомобильных дорог составляет около 88 тыс. км, количество инженерных сооружений (мостов, эстакад и т. п.) превышает 2,8 тыс. Дороги

Таблица 1. Транспортировка грузов по видам транспорта в регионах российского Севера

Регион	Перевозки грузов в 2017 г. различными видами транспорта, млн т		
	автомобильный	железнодорожный	внутренний водный
Республика Коми	28,4	13,7	0,19
Ненецкий АО	3	0	0,064
Ханты-Мансийский АО – Югра	135,1	13,9	4,24
Ямало-Ненецкий АО	29,9	11,9	1,72
Красноярский край	78,2	53,3	11,38
Республика Саха (Якутия)	16,4	13,6	4,73
Магаданская область	2,2	0	0,04
Камчатский край	1	0	0,006
Чукотский АО	1,5	0	0,33

Источник: данные Росморречфлота, Росавтодора, Росстата.

Таблица 2. Протяжённость автомобильных дорог в регионах российского Севера в 2018 г., км

Регион	Дороги			Инженерные сооружения, ед.
	всего	с твёрдым покрытием	с улучшенным твёрдым покрытием	
Республика Коми	7534,30	6479,9	4447,7	389
Ненецкий АО	350,70	248,7	86,7	42
Ханты-Мансийский АО – Югра	6945,70	5739,1	5215,9	270
Ямало-Ненецкий АО	2504,40	2327,2	2027,9	246
Красноярский край	32 595,10	27 540,4	12 081,5	928
Республика Саха (Якутия)	30 424,46	11 899,7	1989,7	503
Камчатский край	2168,19	2039,6	678,7	166
Магаданская область	2803,61	2565,7	484,7	213
Чукотский АО	3354,35	850,5	49,6	82
Итого	88 680,81	59 690,8	27 062,4	2839

Источник: данные Росстата.

с твёрдым покрытием (асфальт, связанный грунт) составляют 67% общей протяжённости, при этом качественное дорожное полотно II и III категорий имеют в среднем только 30% дорог. В Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском АО свыше 90% дорог асфальтированы, тогда как в Красноярском крае доля асфальтовых и асфальтобетонных дорог не превышает 30%, а в Якутии, Магаданской области, Чукотском АО большинство дорог не асфальтированы вообще (табл. 2).

По данным Минтранса России, стоимость 1 км строительства новых дорог (в расчёте на одну полосу движения) без учёта НДС составляет 11,73–52,28 млн руб.; реконструкции автомобильных дорог – 10,32–46,03 млн; капитального ремонта дорожного полотна – 9,71–

20,62 млн; текущего ремонта – 3,89–7,29 млн руб. Вилка цен зависит от качества дорожного полотна, категории дороги и региона строительства³. Самые дорогие – дороги I категории с улучшенным покрытием (асфальтобетон, цементобетон), самые дешёвые – дороги V категории, включая грунтовые дороги и дороги с улучшенным твёрдым грунтом (табл. 3).

В рассматриваемых регионах дороги I категории отсутствуют, поэтому из расчётов они исключены. Кроме того, не использовалась оценка текущего ремонта автодорог, поскольку в условиях деградации вечной мерзлоты предполагается, что для полноценного функционирования дорожной сети невозможно обойтись текущим ремонтом дорожного полотна.

Таблица 3. Средняя стоимость дорожных работ в России в 2017 г.

Виды работ	Средняя стоимость работ, млн руб.				
	в расчёте на 1 км полотна соответствующей категории автомобильных дорог				в расчёте на единицу инженерного сооружения
	II	III	IV	V	
Строительство	42,53	37,1	14,09	11,73	1382,24
Реконструкция	28,41	32,93	13,73	10,32	557,78
Капитальный ремонт	17,88	17,21	9,74	9,71	
Текущий ремонт	7,13	6,69	6,49	3,89	

Источник: данные Минтранса России.

³ В докладе Минтранса России оценка стоимости проводилась по сопоставимой региональной выборке объектов и варьировалась от 256 до 4000 объектов по всей территории России.

Методологические подходы к экономической оценке риска протаивания и деградации вечно-мёрзлых грунтов для устойчивости дорожной инфраструктуры. Для экономической оценки последствий протаивания и деградации вечно-мёрзлых грунтов для устойчивости дорожной инфраструктуры и функционирования автотранспортной системы в целом ключевыми представляются следующие показатели. Во-первых, стоимость основных фондов под риском, отражающая максимальный потенциальный ущерб от снижения несущей способности вечно-мёрзлых грунтов и последующего разрушения построенных на них сооружений. Во-вторых, протяжённость автомобильных дорог и количество инженерных сооружений под риском, позволяющая оценить масштаб проблемы в натуральных единицах, что, в свою очередь, даёт возможность проводить последующую корректировку оценок стоимости. В-третьих, стоимость реконструкции, нового строительства или возможного ремонта основных фондов под риском — по сути, оценка затрат соответствующего экономического субъекта на снижение риска устойчивости дорожной инфраструктуры при реализации конкретного сценария протаивания и деградации вечной мерзлоты и её последствий.

В настоящее время Росстат ведёт ежегодный учёт основных фондов по следующим стоимостным показателям: отраслевая структура основных фондов (добыча сырья, сельское хозяйство, промышленность, транспорт и т. д.); видовая структура основных фондов (здания, сооружения, машины и оборудование, транспортные средства, иные фонды); региональная стоимость основных фондов (по субъектам Российской Федерации); структура основных фондов по видам собственности (государственная, муниципальная, частная и т. п.). В качестве статистической базы для оценки стоимости основных фондов дорожной инфраструктуры использовались соответствующие данные Росстата в региональном разрезе. Статистические данные о полной стоимости основных фондов на конец 2017 г. использовались, принимая во внимание то обстоятельство, что около 40% основных фондов в исследуемых регионах практически полностью амортизированы и, соответственно, статистический учёт не всегда отражает реальную картину [15].

Применительно к выбору статистических показателей определено, что основные фонды дорожного хозяйства относятся к категории "транспорт" (дороги) и "сооружения" (инженерные сооружения), в части имущественных прав — к категории федеральной, региональной

и муниципальной собственности [15]⁴. Необходимо отметить, что региональные статистические показатели не дают полного понимания стоимости дорожной инфраструктуры. Поэтому для расчётов использовались данные по общей стоимости основных фондов на региональном уровне ($ОФ_{рег}$), из которых выделялась доля государственных основных фондов ($ОФ_{гос}$). На заключительном этапе использовались статистические данные по доле основных фондов транспортной отрасли в региональном разрезе по методологии учёта Росстата ($ОФ_{транс}$), из которых выделялась дорожная инфраструктура, соответствующая категории "сооружения" ($ОС_{дор}$). В общем виде формула расчёта стоимости основных фондов автомобильных дорог в конкретном регионе выглядит следующим образом:

$$ОФ = ОФ_{рег} \cdot ОФ'_{гос} \cdot ОФ'_{транс} \cdot ОФ_{дор}, \quad (1)$$

где $ОФ$ — стоимость основных фондов дорожной инфраструктуры в регионе; $ОФ_{рег}$ — общая стоимость основных фондов в регионе; $ОФ'_{гос}$ — доля государственных и муниципальных основных фондов; $ОФ'_{транс}$ — доля основных фондов транспортной отрасли региона; $ОФ_{дор}$ — доля дорожной инфраструктуры в структуре транспортной отрасли региона.

Поскольку данные о наличии или отсутствии вечной мерзлоты под конкретной дорогой на всём её протяжении или под конкретным инженерным сооружением дорожной инфраструктуры на рассматриваемых территориях отсутствуют, для оценки протяжённости дорог и/или количества инженерных сооружений дорожной инфраструктуры, расположенных на вечной мерзлоте, использовалась ранее апробированная методика [14], основанная на критериях Международной ассоциации мерзлотоведения. В соответствии с ними в зоне сплошной мерзлоты 90% протяжённости дорог (или количества сооружений) считаются построенными на многолетнемёрзлых грунтах. Соответствующие критерии для зон прерывистой, массивно-островной и островной вечной мерзлоты составляют 50%, 10% и 0% (то есть объекты сооружены вне зоны вечно-мёрзлых грунтов). В общем виде формула расчёта выглядит следующим образом:

⁴ В настоящем исследовании не проводится оценка частных автодорог, которые существуют в ряде регионов России (к примеру, в Ямало-Ненецком и Ханты-Мансийском АО), поскольку это в большей степени частный случай конкретной местности и фактические данные о качественно-количественных параметрах этих дорог отсутствуют в статистическом учёте.

$$D = 0,9D_n + 0,5D_n + 0,1D_\phi, \quad (2)$$

где D – общая протяжённость автомобильных дорог, построенных на вечномёрзлых грунтах; D_n – протяжённость дорог, построенных в зоне сплошной мерзлоты; D_n – протяжённость дорог, построенных в зоне прерывистой мерзлоты; D_ϕ – протяжённость дорог, построенных в зоне массивно-островной мерзлоты.

Для стоимостной оценки основных фондов дорожной инфраструктуры (дорог и инженерных сооружений), построенных на вечномёрзлых грунтах, используются те же критерии, что и в формуле (2). При этом для расчёта стоимости строительства, реконструкции или капитального ремонта дорожной инфраструктуры используются данные Минтранса России о текущей стоимости этих видов работ, а также о протяжённости дорожного полотна, рассчитанные по формуле (2). В итоге стоимость основных фондов дорожной инфраструктуры, расположенных в зоне вечной мерзлоты, может быть рассчитана по формуле:

$$OF^* = 0,90OF_n^* + 0,50OF_n^* + 0,10OF_\phi^* \quad (3)$$

На заключительном этапе даётся оценка ожидаемого ущерба от протаивания и деградации вечной мерзлоты для дорожной инфраструктуры при различных сценариях климатических изменений и затратах на поддержание и модернизацию этой инфраструктуры до 2050 г. Оценка производится на основе моделирования, базовым сценарием которого предусматриваются деградация вечномёрзлых грунтов на указанную дату и необходимость соответствующих затрат на поддержание дорожной инфраструктуры в рабочем состоянии. При этом принималось во внимание, что эти затраты являются дополнительными по отношению к текущим расходам на содержание указанной инфраструктуры, поскольку они обусловлены не амортизацией (техническим износом) дорожного полотна, а последствиями протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов.

Прогноз динамики функционирования и развития дорожной инфраструктуры без учёта климатического фактора и его влияния на несущую способность вечномёрзлых грунтов и их последствий для устойчивости дорожной инфраструктуры включает три сценария (табл. 4). В основу сценариев положены индикаторы Транспортной стратегии России до 2030 г. [16], утверждённой Правительством РФ в 2008 г. с дополнениями и уточнениями вплоть до 2016 г. В Стратегии отсутствуют чёткие критерии определения изменения качественного состояния дорожного полотна по итогам её реализации. Указано лишь, что к 2030 г. соответствующая доля дорог в России будет отвечать нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям. Поскольку в документах Минтранса России разъяснения по критериям определения нормативных требований отсутствуют [17], в расчётах применяется допущение, что улучшение качества дорожного полотна подразумевает улучшение по категориям дорог.

Консервативный (инерционный) сценарий предусматривает поддержание текущего состояния дорожной инфраструктуры, исходя из её существующего качества и протяжённости дорог. Подразумевается, что общая стоимость капитальных затрат распределена по годам пропорционально в течение всего периода 2019–2030 гг.

Умеренный сценарий предполагает, что дорожная инфраструктура будет развиваться, но темпы роста протяжённости дорог и улучшения их качества до 2030 г. будут невелики, соответствуя целевым индикаторам Стратегии и утверждённым федеральным, региональным и муниципальным программам развития транспортной системы, а именно: протяжённость автомобильных дорог к 2030 г. увеличится на 2,52%, а доля дорог с твёрдым асфальтовым покрытием в том же году составит 60,55% общей протяжённости автодорог (см. табл. 4).

Модернизационный сценарий предусматривает строительство новых сооружений дорожной инфраструктуры наряду с поддержанием в над-

Таблица 4. Сценарии развития дорожной инфраструктуры в регионах российского Севера с преобладанием вечной мерзлоты*

Сценарий	Увеличение протяжённости автомобильных дорог к 2030 г., % (2018 = 100%)	Доля автомобильных дорог с твёрдым асфальтовым покрытием, %	
		2018	2030
Консервативный	100,00	30,6	30,60
Умеренный	102,52	59,6	60,55
Модернизационный	107,71	59,6	98,30

* Сплошная, прерывистая и массивно-островная вечная мерзлота.

лежащем состоянии существующего дорожного полотна и инженерных сооружений, их поэтапной реконструкцией и улучшением качества. Согласно этому сценарию протяжённость автомобильных дорог в 2030 г. вырастет на 7,71%, а доля дорог с твёрдым асфальтовым покрытием достигнет 98,3% общей протяжённости автодорог (см. табл. 4).

Для оценки влияния на устойчивость дорожной инфраструктуры ухудшения несущей способности вечномёрзлых грунтов из-за потепления климата на перечисленные выше сценарии нужно наложить прогнозы изменения климата. Использовались шесть глобальных моделей изменения климата⁵, которые применялись Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) при подготовке V Оценочного доклада по изменениям климата (CMIP-5) на период до середины XXI в. Указанные модели позволяют с высокой достоверностью прогнозировать температуру воздуха у поверхности земли в северных регионах России [1, 13]. Результаты моделирования температуры и осадков у поверхности были усреднены во временных интервалах 2006–2015 и 2050–2059 гг.

В качестве базовой оценки последствий климатических изменений в рассматриваемых регионах до середины текущего века был использован наиболее жёсткий (радикальный) из прогнозов глобальных изменений климата — сценарий RCP8.5. Представляется, что он в наилучшей степени отражает динамику наиболее вероятных изменений климата в северных, прежде всего арктических, регионах России, позволяя получить оценку максимальных рисков (ожидаемого ущерба) от этих изменений. Кроме того, прогноз исходит из предположения, что деградация многолетнемёрзлых грунтов происходит постепенно под влиянием роста температуры приземного воздуха. Поэтому в рамках взятого за основу сценария принято допущение о поэтапном сокращении толщи вечномёрзлых грунтов в течение ближайших 30 лет. Учитывая, что прогноз ежегодных масштабов протаивания и деградации грунтов и их влияния на устойчивость дорожной инфраструктуры невозможен, считается, что ожидаемый суммарный ущерб распределится равномерно в течение 2019–2050 гг.

Наиболее опасные последствия деградации вечномёрзлых грунтов в долгосрочной перспективе — снижение несущей способности зданий и осадка грунта при оттаивании. Применительно к настоящему исследованию в качестве методологической базы оценки таких явлений использова-

лись результаты, полученные ранее и основанные на авторских геотехнических моделях изменений многолетнемёрзлых пород [14, 18]. Конкретные значения изменений рассчитывались по следующей формуле:

$$S = dZ \cdot I, \quad (4)$$

где S — величина проседания грунта, мм; dZ — временная разница в толщине сезонно талого слоя многолетнемёрзлых пород в 2005–2015 и 2050 гг.; I — льдистость грунтов, %.

Оценка затрат на снижение риска (ожидаемого ущерба) для дорожной инфраструктуры от протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов под влиянием потепления климата. В соответствии с изложенной выше методикой дадим оценку стоимости основных фондов дорожной инфраструктуры под риском. Для этого необходимо произвести расчёты и определить значения элементов в правой части формул (2) и (3).

Согласно данным Росстата, в 2018 г. суммарная стоимость основных фондов в рассматриваемых девяти регионах достигала 34,72 трлн руб., или 17% общей стоимости основных фондов в России. В структуре основных фондов регионов доля транспорта составляет около 30%, или 10,29 трлн руб. На долю федеральной, региональной и муниципальной собственности, к которой относятся автомобильные дороги, приходится около 27% общей стоимости основных фондов транспорта. Из них треть, или 763,2 млрд руб., приходится на дорожную инфраструктуру (автомобильные дороги и инженерные сооружения — мосты, эстакады и т.д.) (табл. 5).

Стоимость основных фондов дорожной инфраструктуры варьируется по регионам: наибольшие значения характерны для Республики Коми, Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского АО, в которых до 90% автомобильных дорог асфальтированы, а также для Красноярского края и Республики Саха (Якутия), где велика протяжённость автодорожной сети (см. табл. 2). Аналогичные различия имеют место и в отношении стоимости указанных фондов, расположенных в зоне вечной мерзлоты. Если в восточных регионах Севера России практически 100% автомобильных дорог сооружено на вечной мерзлоте, то в Республике Коми — всего около 25%.

По оценкам авторов, общая стоимость основных фондов дорожной инфраструктуры в зоне вечной мерзлоты составляет 204 млрд руб., из которых 143 млрд (70%) приходится на Ямало-Ненецкий АО. Это связано как с природно-географическими особенностями региона (размещением практически всей его территории на вечномёрзлых грунтах), так и с протяжённо-

⁵ В их числе: CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, IPSLCM5A-LR и NorESM1-M.

Таблица 5. Стоимость основных фондов дорожной инфраструктуры в регионах российского Севера в 2018 г.

Регион	Стоимость основных фондов, млрд руб.		
	Всего	в том числе основные фонды в федеральной, региональной и муниципальной собственности	основные фонды в федеральной, региональной и муниципальной собственности в зоне вечной мерзлоты
Республика Коми	3207,3	122,4	3,6
Ненецкий АО	887,4	2,7	1,7
Ханты-Мансийский АО – Югра	12 543,0	245,1	5,9
Ямало-Ненецкий АО	11 279,8	292,9	142,9
Красноярский край	3604,5	41,0	2,4
Республика Саха (Якутия)	2208,1	51,1	43,8
Камчатский край	540,8	3,9	0,3
Магаданская область	281,0	3,4	2,8
Чукотский АО	170,4	0,7	0,7
Итого	34 722,3	763,2	204,0

Источник: расчёты авторов по данным Росстата.

стью его дорожной сети и качеством дорожной инфраструктуры. В восточных регионах Сибири (Якутия, Чукотский АО, Магаданская область) также преобладают вечномёрзлые грунты, но большинство автомобильных дорог являются грунтовыми, а инженерные сооружения (например, мосты) – деревянные или металлические, поэтому стоимость существующих основных фондов дорожной инфраструктуры значительно меньше. При этом показатель текущей стоимости основных фондов дорожной инфраструк-

туры в большой степени условный, учитывая, что у значительной их доли сроки амортизации давно истекли. Так, стоимость автодорог в рассматриваемых регионах составляет, согласно оценкам Росстата, около 760 млрд руб. при их общей протяжённости 88 тыс. км, что практически в 2,5–3 раза ниже стоимости строительства аналогичных объектов.

Более точные оценки масштабов проблемы получены на основе расчётов по натуральным показателям состояния дорожной инфраструктуры.

Таблица 6. Протяжённость автомобильных дорог, расположенных в зоне вечной мерзлоты в регионах российского Севера в 2018 г.

Регион	Общая протяжённость, км	В том числе по категориям, км				Инженерные сооружения, ед.
		II	III	IV	V	
Республика Коми	449,40	0,00	44,59	184,87	219,94	24
Ненецкий АО	216,95	0,00	13,78	40,73	162,43	26
Ханты-Мансийский АО – Югра	166,61	3,15	33,63	97,53	32,30	7
Ямало-Ненецкий АО	1222,08	0,00	192,86	771,43	257,79	121
Красноярский край	1871,50	0,00	185,08	499,14	1187,27	50
Республика Саха (Якутия)	26 028,19	0,00	306,71	3284,29	22 437,19	433
Камчатский край	187,61	0,29	11,33	43,47	132,52	15
Магаданская область	2322,36	125,86	116,36	624,14	1456,00	159
Чукотский АО	3006,95	0,00	0,00	57,67	2949,28	74
Итого	35 471,64	129,30	904,34	5603,28	28 834,72	909

Источник: расчёты авторов.

В зоне вечной мерзлоты проложено 35,471 тыс. км автодорог и 909 мостовых переходов (табл. 6). Из них на долю асфальтированных дорог II и III категорий приходится 2,9%, на грунтовые дороги улучшенной и технической категорий — 97,1%. Обращает на себя внимание Якутия, на которую приходится почти 3/4 протяжённости автодорог в зоне вечной мерзлоты: свыше 90% этих дорог грунтовые.

В соответствии с принятой методикой рассмотрим перечисленные ранее (см. табл. 4) сценарии влияния протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов на устойчивость сооружённой на них дорожной инфраструктуры и дадим прогнозные оценки затрат на снижение риска (ожидаемого ущерба) на 2020–2050 гг. (табл. 7).

Консервативный сценарий предполагает, что существующая дорожная инфраструктура на вечной мерзлоте, включая более 35 тыс. км дорожной сети, будет нуждаться в постоянных дополнительных капитальных затратах на ремонт и поддержание устойчивого функционирования, обусловленных деградацией мерзлоты и снижением несущей способности грунтов, а также деформацией поверхности из-за осадков при протаивании сильнольдистых грунтов. Исходя из данных таблицы 3, эти затраты в рассматриваемых девяти регионах за весь указанный период достигнут 422,68 млрд руб., в том числе 252,83 млрд (59,8%) придётся на Якутию. Таким образом, дополнительные затраты достигнут 14,07 млрд руб. в среднем в год,

или 0,14% по отношению к суммарному ВРП всех девяти регионов в 2018 г. Наиболее высокие показатели будут в Якутии, Красноярском крае, Магаданской области и на Чукотке (см. табл. 7).

Умеренный сценарий предусматривает, что в соответствии со Стратегией к 2030 г. в рассматриваемых регионах 17,46 тыс. км автодорог на вечной мерзлоте подвергнется реконструкции с доведением их качественных характеристик до 60,55% дорог V категории (с твёрдым асфальтовым покрытием) (см. табл. 4). Кроме того, дополнительно будет построено 2234,75 км дорог (пропорционально по регионам) и 56 инженерных сооружений. В 2020–2050 гг. на капитальный ремонт дорожного полотна и инженерных сооружений из-за последствий деградации вечномёрзлых грунтов необходимо будет дополнительно израсходовать 304,24 млрд руб. Реконструкция части дорожной сети с улучшением качественных характеристик в 2020–2030 гг., а также последующее поддержание этой инфраструктуры в надлежащем состоянии в 2030–2050 гг. оцениваются в 272,9 млрд руб. Стоимость расширения автодорожной сети в 2020–2030 гг. и затраты на её последующую эксплуатацию составят 67,34 млрд руб. При этом расходы на строительство и реконструкцию дорог в 2020–2030 гг. учитываются в том числе и как стоимость их восстановления в связи с деградацией вечной мерзлоты.

Таким образом, предполагается, что совокупные затраты включают стоимость капитального

Таблица 7. Прогноз затрат на восстановление и поддержание устойчивого функционирования региональной дорожной инфраструктуры в связи с риском протаивания и деградации вечной мерзлоты, млрд руб., цены 2018 г.

Регион	ВРП	Инфра-структура под риском, %*	Консервативный		Умеренный		Модернизационный	
			2020–2050	ежегодно	2020–2050	ежегодно	2020–2050	ежегодно
Республика Коми	574,38	89,1	20,05	0,67	27,70	0,92	32,55	1,09
Ненецкий АО	276,49	40,0	7,59	0,25	9,55	0,32	10,53	0,35
Ханты-Мансийский АО – Югра	3511,1	27,2	2,05	0,07	2,62	0,09	3,42	0,11
Ямало-Ненецкий АО	2461,4	27,6	25,91	0,86	31,43	1,05	35,74	1,19
Красноярский край	1882,3	63,1	42,49	1,42	62,51	2,08	81,41	2,71
Республика Саха (Якутия)	916,58	33,6	252,83	8,43	409,43	13,65	566,12	18,87
Камчатский край	201,64	5,8	0,71	0,02	0,98	0,03	1,10	0,04
Магаданская область	157,63	25,8	35,55	1,19	45,80	1,53	55,15	1,84
Чукотский АО	68,729	35,7	35,5	1,18	54,46	1,82	78,81	2,63
Итого	10 050	18,8	422,68	14,09	644,48	21,48	864,81	28,83

* Использованы расчёты из предыдущей работы авторов [14].

Источник: расчёты авторов.

ремонта, общие дополнительные расходы на поддержание дорожной инфраструктуры, в том числе новые автодороги, реконструируемые участки, а также оставшуюся автодорожную сеть. До 2050 г. эти затраты составят 644,48 млрд руб. (в среднем 21,46 млрд руб. в год), что эквивалентно 0,21% суммарного ВРП 2018 г. всех девяти регионов. Как и в предыдущем сценарии, наибольшие показатели будут характерны для Якутии, Магаданской области и Чукотки (см. табл. 7).

Модернизационный сценарий предполагает в соответствии со Стратегией доведение доли качественного дорожного полотна в рассматриваемых регионах до 98,3% к 2030 г., или фактическую реконструкцию 28 344,53 км дорог, а также дополнительное строительство 6837,29 км новых дорог и 171 инженерного сооружения. В 2020–2030 гг. затраты на реконструкцию автодорог, расположенных в зоне вечной мерзлоты, составят 426,65 млрд руб., на поддержание устойчивого функционирования существующей дорожной инфраструктуры в 2020–2050 гг. — 230,39 млрд руб. Затраты на строительство новых автодорог и инженерных сооружений в 2020–2030 гг. и на их содержание в 2030–2050 гг. оцениваются в 207,75 млрд руб. Таким образом, совокупные затраты за весь период до 2050 г. достигнут 864,81 млрд руб., или 28,83 млрд руб. в среднегодовом выражении, что эквивалентно 0,29% суммарного ВРП всех девяти регионов в 2018 г. Максимальные показатели будут характерны для Чукотского АО, Якутии и Магаданской области (см. табл. 7).

* * *

Многолетняя мерзлота — одна из главных отличительных черт природных условий российской Арктики, определивших конструктивные особенности и экономику строительства практически всех капитальных сооружений (зданий, объектов ТЭК, взлётно-посадочных полос, дорог и т.д.), возведённых на протяжении почти векового её освоения. В последние несколько десятилетий глобальные климатические изменения, прежде всего ускоренный рост приземной температуры воздуха, существенно изменили природные условия, особенно целостность и устойчивость многолетнемёрзлых пород, вызвав их протаивание, деградацию и, соответственно, снижение несущей способности. Это превратило огромную территорию в зону повышенного инвестиционного риска, в том числе для строительства и поддержания функционирования транспортной инфраструктуры, развитие которой является альфой и омегой современного переосвоения данного стратегического макрорегиона.

Расчёты, выполненные на основе предложенной в данной работе методики оценки послед-

ствий протаивания и деградации вечномёрзлых грунтов под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в российской Арктике, показывают, что даже при инерционном (консервативном) сценарии развития транспортной инфраструктуры в целом и дорожной инфраструктуры в частности риски нарушения её устойчивости и разрушения под влиянием протаивания и деградации вечной мерзлоты весьма велики. Только прямой ожидаемый ущерб (без учёта косвенных потерь от срыва сроков своевременной доставки и вывоза грузов, затрат на устранение аварий и др.) для устойчивого функционирования дорожной инфраструктуры в девяти арктических регионах составит не менее 14 млрд руб. Таким образом, дополнительные (по отношению к текущим расходам на содержание) затраты на ремонт и поддержание устойчивого функционирования инфраструктуры составят 0,14% стоимости суммарного ВРП этих регионов в 2018 г. В Якутии, Красноярском крае, Магаданской области и на Чукотке, экономика которых наиболее уязвима к рискам деградации вечномёрзлых грунтов, этот показатель будет значительно выше. При модернизационном сценарии, который включает строительство новых автомобильных дорог и инженерных сооружений и улучшение качества уже построенных дорог (что позволит повысить их пропускную способность и снизить вышеупомянутые риски), затраты на поддержание устойчивого функционирования дорожной инфраструктуры удвоятся с максимальными показателями в Чукотском АО, Якутии и Магаданской области.

Реализация модернизационного сценария требует пересмотра существующих стандартов, технологий и всей экономики дорожной инфраструктуры и капитального строительства в целом в пользу развития инновационных (включая ресурсоэффективные и экологичные "зелёные") стандартов и технологий строительства [15], а также совершенствования предложенных методологии и методики оценки затрат на эти цели. В частности, их нужно дополнить анализом сценария, предусматривающего более продолжительные сроки протаивания, деградации и полного исчезновения вечной мерзлоты, что существенно скажется на общей стоимости, распределении и, следовательно, рисках инвестиций. Кроме того, чтобы корректно оценить возникающую дополнительную нагрузку на экономику регионов российской Арктики, нужно соотнести её с экономической динамикой. Для этого, в свою очередь, необходимы прогнозы экономического роста не только на долгосрочную (до 2030–2035 гг.), но и на отдалённую (до 2050 г.) перспективу.

Перечисленные императивы должны быть все-сторонне учтены в новой Стратегии развития российской Арктики до 2035 г., о разработке которой объявил Президент РФ, выступая на V Международном арктическом форуме в Санкт-Петербурге 9 апреля 2019 г. Стратегия должна объединить мероприятия национальных проектов и государственных программ, инвестиционных планов инфраструктурных компаний, программы развития арктических городов и регионов, при этом особое внимание следует уделить развитию транспорта и другой опорной инфраструктуры [19].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Климатические и физико-географические расчёты состояния вечной мерзлоты были выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-00-00600 (18-00-00596) "Сценарии изменений глобального климата и оценки последствий их реализации для социально-экономического развития России в XXI веке" и № 18-05-60252_Арктика "Неучтённые региональные механизмы климатических изменений в Арктике и их влияние на предсказуемость климата и экономические аспекты освоения Арктического пространства России". Разработка методологии экономической оценки рисков деградации вечной мерзлоты для устойчивости дорожной инфраструктуры регионов российской Арктики, соответствующие расчёты и сценарное моделирование выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-00-00600 (№ 18-00-00599 "Анализ и стратегии управления климатическими рисками долгосрочного социально-экономического развития России"), № 19-010-00675 "Программно-целевое управление транспортно-инфраструктурным комплексом Арктической зоны РФ" и № 18-05-60088 "Устойчивость развития арктических городов в условиях природно-климатических изменений и социально-экономических трансформаций".

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам, замечания которых позволили уточнить ряд формулировок и улучшить качество статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP), 2017.
2. Спорышев П.В., Катцов В.М., Говоркова В.А. Эволюция температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2016. № 583. С. 45-84.
3. Российская Арктика: современная парадигма развития / Под ред. А.И. Татаркина. СПб.: Нестор-История, 2014.
4. Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий европейского северо-востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации. Научно-информационный бюллетень. 2009. Т. 9. С. 96-106.
5. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 22-32.
6. Рекомендации по устройству свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах. М.: НИИОСП, 1985; СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990.
7. Instanes A., Anisimov O. Climate change and Arctic infrastructure // Proc. 9th Int. Conf. on Permafrost. 2008. P. 779-784.
8. Hong E., Perkins R., Trainor S. Thaw settlement hazard of permafrost related to climate warming in Alaska // Arctic. 2014. V. 67. № 1. P. 93-103.
9. Nelson F.E., Anisimov O.A., Shiklomanov N.I. Subsidence risk from thawing permafrost // Nature. 2001. № 410. P. 889-890.
10. Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. et al. Terrestrial permafrost // Bulletin of the American Meteorological Society. 2015. V. 96. № 7. P. S139.
11. Shiklomanov N.I., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. Terrestrial permafrost // Bulletin of the American Meteorological Society. 2014. V. 95. № 7. P. S139.
12. Чеснокова И.В. Оценка ущерба от криогенных процессов и проблема страхования их последствий для территории РФ // X Международная конференция по мерзлотоведению (ТИСОР) "Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире". Т. 5. Тюмень: Печатник, 2012.
13. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемёрзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. Оценочный отчёт / Под ред. О.А. Анисимова. М.: Greenpeace, 2009.
14. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 025003. P. 1-15.
15. Социально-экономическое развитие российской Арктики в контексте глобальных изменений климата / Под ред. Б.Н. Порфирьева. М.: Научный консультант, 2017.
16. Распоряжение от 22 ноября 2008 г. № 1734-р "Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года". <http://docs.cntd.ru/document/902132678> (дата обращения 27.11.2019).
17. Приказ Росавтодора от 20.02.2013 г. № 29 «Об утверждении Методики расчёта значений показателя "Протяжённость автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, соответствующих нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям (в процентах к 2011 году)»».

18. *Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E.* Permafrost, infrastructure and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling // *Arctic, Antarctic, Alpine Res.* 2012b. V. 44. P. 368-380.
19. Выступление Президента России В.В. Путина на Пленарном заседании V Международного арктического форума "Арктика – территория диалога" 9 апреля 2019 г. www.kremlin.ru/events/president/news/60250 (дата обращения 12.04.2019).

ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPACT OF PERMAFROST DEGRADATION INDUCED BY CLIMATE CHANGE THE ROAD INFRASTRUCTURE RESILIENCE IN THE RUSSIAN ARCTIC

© 2019 B.N. Porfiriev^{1*}, D.O. Elisseev^{2,3**}, D.A. Streletskiy^{4,5***}

¹*Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Russian New University, Moscow, Russia*

³*Sochi Research Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia*

⁴*George Washington University, Washington DC, USA*

⁵*Institute of the Earth's Cryosphere of Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia*

*E-mail: b_porfiriev@mail.ru; **E-mail: elisd@mail.ru; ***E-mail: strelets@gwu.edu

Received 04.06.2019

Revised version received 04.06.2019

Accepted 24.06.2019

This paper evaluates three model scenarios of road infrastructure resilience variation resulting from the climate change-induced degradation and thawing of permafrost in nine regions of the Russian Arctic. To provide economic assessment of climate change implications for development of the regions above by mid-21st century model estimates of the permafrost a physic-geographic basis for conditions have been used. These estimates are obtained using the IPCC six key scenarios of climate change including the most negative RCP 8.5 scenario considered as the most similar to Russian Arctic environments. The upgraded data from the Transportation Strategy of the Russian Federation served a basis for forecasting the road infrastructure development by 2035. It is argued that the "business as usual" (conservative) scenario of the road infrastructure development in the explored nine regions of the Russian Arctic from 2020 to 2050 implies annual investments of 14 billion rubles to maintain resilience and reduce the risks of destruction of the infrastructure following permafrost thawing and degradation. The investments for the moderate and modernization scenarios will exceed 21 billion and 28 billion rubles, respectively, with the maximal numbers expected in the Yakutia, Magadan, and Chukotka regions. Implementation of the modernization scenario assumes reconsideration of the existing standards, technologies, and the road infrastructure and capital construction economics as a whole. Priority areas include innovation standards and construction technologies development as well as improvement of the methodology and procedures of respective investments assessments considered in this paper.

Keywords: Russian Arctic, regions, climate change, permafrost, thawing, degradation, road infrastructure, investments, risks, development scenarios.