

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ И БЕЗОПАСНОЙ СВЯЗНОСТИ ТЕРРИТОРИИ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ С УЧЕТОМ ЭНЕРГО- ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

**Ю.В. Трофименко**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 12515, Москва, Ленинградский пр-т, 64  
E-mail: ywtrofimenko@mail.ru

**А.Н. Якубович**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 12515, Москва, Ленинградский пр-т, 64  
E-mail: 54081@mail.ru

**Т.Ю. Григорьева**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 12515, Москва, Ленинградский пр-т, 64  
E-mail: grigorievamadi@yandex.ru

**А.В. Шашина**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)*  
Россия, 12515, Москва, Ленинградский пр-т, 64  
E-mail: shelvlad@gmail.com

**Ключевые слова:** Транспортная доступность, связность территории, функциональная надежность ОТИ, монетизация вреда и выгод, адаптивная способность природных экосистем в транспортных коридорах.

**Аннотация:** Статья посвящена анализу необходимости обеспечения эффективного и экологически безопасного функционирования объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ), технологий организации перевозок, обеспечивающих транспортную доступность и связность территории криолитозоны России в условиях климатических изменений. Рассмотрены алгоритм, научные подходы и методы, лежащие в основе методологических принципов обеспечения устойчивой и безопасной связности территории арктических регионов с учетом энерго-экологических ограничений в условиях климатических изменений.

## 1. Введение

Актуальность работы определяется необходимостью обеспечения эффективного и экологически безопасного функционирования объектов транспортной инфраструктуры, технологий организации перевозок, обеспечивающих транспортную доступность и связность территории криолитозоны России в условиях климатических изменений.

Основные последствия климатических изменений заключаются в негативном воздействии на объекты транспортной инфраструктуры (ОТИ), в числе которых деформация дорожного покрытия и искусственных сооружений из-за оседания почвы в районах вечной мерзлоты, а также изменение сроков использования зимников, ледовых переправ и навигации на реках, сбои в работе транспорта при организации доставки товаров и грузов, что ведет к ухудшению транспортной доступности и связности территорий, снижению качества жизни населения и вынужденной миграции населения. Дополнительные риски нарушения функциональности ОТИ и технологий перевозок обуславливаются сопровождающими климатические изменения увеличениями частоты и повышениями интенсивности чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного (наводнений, ураганных ветров, ливневых дождей, снегопадов, экстремальных температур и др.) и техногенного характера. Достоверное прогнозирование технико-эксплуатационного состояния отдельных инфраструктурных элементов является критически важным для осуществления адаптационных мероприятий, направленных на гарантированное обеспечение живучести ОТИ, систем управления перевозками на территории криолитозоны в условиях климатических изменений.

Проведение фундаментального исследования взаимосвязей между изменением климата и технико-эксплуатационной пригодностью инфраструктурных объектов, транспортных технологий является необходимым условием для получения научно-обоснованных прогнозов технико-эксплуатационного состояния ОТИ, систем управления перевозками, а также их адаптационных возможностей по поддержанию работоспособности в условиях климатических изменений на территории арктических регионов. Приемлемые варианты адаптации должны оцениваться путем включения в рассмотрение не только оценки вреда, но и сопутствующих выгод (экосистемного эффекта), затрат и последствий смягчения негативных воздействий изменяющегося климата.

В настоящее время методологические вопросы оценки возможного вреда, связанного с таянием многолетней мерзлоты, изменением сроков навигации на реках, использования зимников и ледовых переправ, в результате транспортной деятельности, оценки углеродного следа, монетизации экосистемных услуг и социально-экологических эффектов на территории арктических регионов при обеспечении их транспортной доступности и связности в условиях изменения климата и реализации адаптационных мероприятий остаются практически неизученными, поскольку имеется целый ряд неопределенностей при их прогнозной оценке, что требует проведения теоретических исследований и разработки соответствующих методологических подходов к их оценке и прогнозированию.

Для повышения адаптационных возможностей и обеспечения живучести ОТИ, транспортных технологий требуется не только определение вариантов адаптации и оценка их стоимости, вреда и выгод, но также увеличение адаптивной способности антропогенных и природных систем в криолитозоне. Отсутствие теоретических исследований в этом направлении уже сегодня создает сложные проблемы управления и необходимость создания новых институтов и институциональных структур. Эти вопросы применительно к объектам транспортной инфраструктуры в условиях изменяющихся характеристик окружающей природной среды требуют научного осмысления, выявления закономерностей усиления адаптационных возможностей ОТИ, т.е. снижения вероятности потери функциональности до допустимого уровня с учетом

их конструктивных особенностей и природно-климатических условий их эксплуатации, использования информационно-коммуникационных технологий мониторинга технико-эксплуатационного состояния, новых материалов и технологий повышения живучести ОТИ. Отсутствие научных основ обеспечения устойчивой и безопасной связности территории арктических регионов Российской Федерации с учетом энерго-экологических ограничений в условиях климатических изменений не позволяет обеспечить комплексное решение проблем повышения качества жизни населения, экономического развития малоосвоенных территорий, минимизации негативного воздействия на окружающую природную среду.

## 2. Основная часть

По мнению многих зарубежных и отечественных экспертов [1-3] существуют следующие риски, связанные с текущим и ожидаемым изменением климата:

- риск деградации уникальных природных систем, имеющих низкий порог адаптивности к различным проявлениям глобальному потеплению (многолетняя мерзлота, арктический морской лед, коралловые рифы, экосистемы с подстилающим слоем снега, кочкарная тундра, горное оледенение);
- риск потери устойчивости грунтов под зданиями, сооружениями, объектами транспортной инфраструктуры;
- риск увеличения частоты экстремальных метеорологических явлений, включая волны тепла (жары), экстремальные осадки, прибрежные наводнения;
- риск негативного воздействия на образ жизни групп коренных народов в Арктике, населения в прибрежной зоне и ресурсы, используемые ими;
- риск глобальных совокупных воздействий на природные системы (потери в экосистемных товарах и услугах, изменение фенологии и географии распространения растений, планктона и рыб) и глобальную экономику (при потеплении на 4 °С потери могут составить до 5% глобального ВВП ежегодно);
- риск резких и необратимых изменений физических систем или экосистем в результате крупномасштабных сингулярных явлений (утрата ледяных щитов, крупномасштабное повышение уровня моря, изменение циркуляции океана).

На объекты транспортной инфраструктуры оказывают влияние как значения климатических факторов (температуры воздуха, количества осадков, числа переходов температуры через точку замерзания, экстремально низких и высоких значений температуры и др.), так и деградация многолетнемерзлых грунтов, обусловленная изменением климата (термокарст, термоэрозия, образование наледей, пучение, курумы, массовые смещения оттаивающего грунта на склонах. Основные воздействия опасных геокриологических процессов на объекты транспортной инфраструктуры можно разделить на три группы: 1) давление на воспринимающую поверхность транспортных сооружений, обусловленное подвижками крупных массивов грунта (оползнями, курумами и др.); 2) формирование пустот в грунте, что ведет к существенному изменению напряженно-деформированного состояния транспортного объекта или его фундамента (термокарст, эрозионные процессы, карст и др.); 3) нарушение полотна автомобильных и железных дорог, покрытий аэродромов, инфраструктуры морских и речных портов (наледи, затопление и др.) [4].

В этом случае можно выделить основные проблемы, связанные с обеспечением надежности функционирования и безопасности эксплуатации существующих ОТИ и транспортных сооружений (их частичное повреждение или полное разрушение вследствие изменения несущей способности при оттаивании вечно мерзлых грунтов); повышением экологических рисков для территории, вызванных как различными

процессами, связанными, например, с изменениями гидрогеологического режима, так и техногенными авариями на поврежденных или разрушенных ОТИ; потерей связанности территорий вследствие сокращения времени использования зимников и ледовых переправ; увеличением выбросов парниковых газов (метана) в результате таяния вечной мерзлоты.

Данные проблемы могут привести к значительному ущербу для территорий, что требует разработку и внедрение мероприятий, направленных на повышение адаптации ОТИ. Эти мероприятия подразумевают внесение изменений в существующие строительные нормы и правила, разработку нормативных документов, учитывающих требования к эксплуатации ОТИ в условиях происходящих климатических изменений.

Применение мероприятий, повышающих функциональность при строительстве, потребует дополнительных затрат, что в итоге скажется на повышении стоимости работ.

Минимизация последствий в результате различных проявлений обозначенных рисков станет возможной посредством повышения адаптационного потенциала и защищенности климатически уязвимых объектов транспортной инфраструктуры, а также развития финансовых и страховых механизмов.

При этом необходимо учитывать, что многие неблагоприятные процессы изначально не проявляются на территории будущих автомобильных или железных дорог, а инициируются постепенно (в течение десятилетий) по мере изменения климатических параметров. Особенно сильно будет влиять на живучесть транспортных сооружений таяние вечной мерзлоты.

Рассмотрим алгоритм, научные подходы и методы, лежащие в основе методологических принципов обеспечения устойчивой и безопасной связности территории арктических регионов с учетом энерго-экологических ограничений в условиях климатических изменений.

*1 Анализ и обобщение российского и международного опыта прогнозирования и управления эксплуатационной надежностью в отношении инфраструктурных объектов в криолитозоне с учетом климатических изменений*

Задачи сбора и анализа информации качественного характера из открытых источников; сбора и анализа открытой информации, включая анализ данных, размещенных в Интернете; сбора и анализа материалов о лучшей мировой практике в области исследования с внедрением и реализацией технологических инноваций предполагается решать с помощью таких методологических подходов, как содержательный подход, количественный, качественный, информационный и сущностный подходы. Использование нескольких методологических подходов в комплексе обусловлено тем, что один подход не исчерпывает методологической характеристики конкретного исследования, и каждый отдельно взятый подход представляет собой качественно новый способ изучения исследуемых явлений, но ни один из них не является универсальным. В итоге применения указанных подходов будут сформированы множества, которые будут являться основой для последующего анализа. При этом уточнение первичных данных планируется провести с использованием технологий искусственного интеллекта (моделей и алгоритмов машинного обучения, идентификации недостающей информации путем восполнения пробелов в исходных данных, восстановления неполных и «зашумлённых» данных).

При изложении вопросов, практически не представленных в научных публикациях (например, оценка вреда и пользы транспортной инфраструктуре от климатических изменений, экосистемных эффектов), авторами планируется использовать метод экспертных оценок и консультаций с ведущими российскими и зарубежными специалистами.

Ожидаемые результаты:

Перечень климатических параметров, влияющих на функциональное состояние инфраструктурных объектов транспорта.

Динамика изменения наиболее значимых климатических параметров на арктических территориях России за период с 2000 по 2023 гг.

Перечень используемых показателей эксплуатационной надежности ОТИ и укрупненные алгоритмы их определения.

*2 Разработка методологических основ оценки вероятности потери функциональности объектов транспортной инфраструктуры в транспортных коридорах на территориях наличия вечномерзлых грунтов в условиях изменения климата.*

Для разработки вероятностной математической модели оценки эксплуатационной надежности ОТИ необходимо сформировать систему количественных показателей технико-эксплуатационной пригодности ОТИ, изменяющихся под влиянием неблагоприятных природно-климатических факторов и отражающих целостность и живучесть конструкции, технологии управления, возможность штатной эксплуатации объекта, существующих и перспективных информационно-коммуникационных технологий мониторинга технико-эксплуатационного состояния, новых материалов, конструкций, технологий адаптации для повышения живучести исследуемых объектов транспортной инфраструктуры и транспортных технологий в прогнозируемых условиях.

Необходимо разработать алгоритм построения единого скалярного критерия, количественно характеризующего эксплуатационную надежность объекта, построить вероятностную модель, отражающую зависимость величины скалярного критерия эксплуатационной пригодности от прогнозируемого состояния климата, ее программно реализовать и апробировать на примере одного из северных регионов России.

Предусматривается также использовать интеллектуальный анализ данных (высокие статистические технологии) для выявления влияния факторов, которые не выявляются в ходе линейного анализа – метод data-mining.

*3 Разработка методологических основ прогнозирования экологического состояния территорий и технико-эксплуатационного состояния ОТИ и логистических систем управления перевозочным процессом на базе комплексной автоматизированной системы дистанционного мониторинга технико-эксплуатационных и природно-климатических показателей*

Цель - прогноз вероятности возникновения ЧС природного характера, времени открытия-закрытия зимников, ледовых переправ, речной навигации на объектах в транспортных коридорах на территории криолитозоны.

Необходимо разработать и обосновать требования и ограничения в отношении комплексной автоматизированной системы дистанционного мониторинга экологического состояния территорий и технико-эксплуатационного состояния ОТИ и логистических систем управления перевозочным процессом, в том числе ее функциональные элементы, перечень наблюдаемых параметров состояния объектов и климата, технические средства наблюдения, рекомендуемую периодичность наблюдения и глубину прогнозирования вероятности возникновения и последствий ЧС на транспортных объектах и при организации перевозок для транспортных коридоров на территориях криолитозоны России.

Следует разработать соответствующую необходимым требованиям функциональную и структурную схему комплексной автоматизированной системы дистанционного мониторинга, а также научно-обоснованные рекомендации по характеристикам и методам построения отдельных элементов этой системы, способам

передачи, хранения и обработки информации в системе, ее взаимодействию с внешними источниками данных.

*4 Разработка методики прогнозирования экологического состояния территорий и технико-эксплуатационного состояния ОТИ и логистических систем управления перевозочным процессом в транспортных коридорах,*

Прогнозирование осуществляется на основе параметров, предоставляемых системой дистанционного мониторинга, с учетом ожидаемых климатических изменений и вероятности наступления ЧС природного характера. При этом процедура прогнозирования основывается на постоянно обновляемых данных о природных и техногенных процессах на рассматриваемых территориях, получаемых с помощью комплексной автоматизированной системы дистанционного мониторинга, что обеспечивает максимальную достоверность получаемых результатов и возможность наиболее эффективного управления процессом перевозок.

*5 Разработка математической модели комплексной оценки и прогнозирования возможных выгод и вреда от потери функциональности ОТИ, систем организации перевозок и затрат на их адаптацию с учетом сценарных прогнозов реализации адаптационных мероприятий.*

Данная математическая модель предполагает использование многометрических оценок возможных выгод и вреда от потери функциональности ОТИ, систем организации и управления перевозочным процессом и затрат на их адаптацию, интегрированных в более широкие политические и этические рамки в целях оценки компромиссных решений и ограничений.

Для построения этой модели необходимо сформулировать методологические принципы использования экосистемного подхода (монетизации экосистемных услуг) для оценки и выявления закономерностей изменения экосистемных эффектов, связанных со строительством, эксплуатацией и адаптацией ОТИ, транспортных технологий в транспортных коридорах на территориях распространения вечной мерзлоты.

*6 Разработка методики оценки углеродного следа, экологических последствий транспортной деятельности на территориях прохождения транспортных коридоров в криолитозоне.*

В основе используемого методического подхода к оценке углеродного следа, обоснованию мероприятий по его уменьшению, и экологической безопасности транспортных технологий в транспортных коридорах при сохранении функциональности ОТИ и обеспечении безопасной связности арктических регионов с учетом использования разных видов транспорта, источников энергии, включая ВИЭ; использования сезонных охлаждающих устройств и др.; снижения потерь грузов и использования реверсивной логистики лежат требования руководящих принципов и указаний Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) Уровней 1, 2 и 3, отличающихся степенью детализации исходных данных, а также рекомендации Всемирной метеорологической организации и Программы ООН по окружающей среде.

Для расчёта выбросов CO<sub>2</sub> транспортом по методике Уровня 1 требуется минимум исходных данных и аналитических возможностей. При реализации этой методики выбросы из всех источников могут быть рассчитаны на основе массы или объёма сжигаемого топлива (известного из национальной и региональной энергетической статистики) и средних коэффициентов эмиссии CO<sub>2</sub> на единицу массы или объёма отдельного вида топлива. При этом применяются средние значения по умолчанию, или в случае доступных национальных исследований, специфичные для страны

национальные коэффициенты по компонентному химическому составу газообразного топлива, содержанию углерода в жидком топливе.

Метод оценки выбросов ПГ Уровня 2 использует нормированные на единицу массы (объёма) сожжённого топлива удельные выбросы или коэффициенты эмиссии ПГ, специфичные для каждой категории транспортных средств разных видов транспорта с разбиением по экологическим классам.

Метод оценки Уровня 3 основан на результатах исследований (или моделирования) характеристик транспортных потоков на маршрутах движения и использования отдельных транспортных средств. В этом случае используются удельные выбросы (коэффициенты эмиссии) ПГ, данные о годовых пробегах транспортных средств по разным категориям дорог, а также учитываются другие факторы.

Методики Уровней 2 и 3 используются для расчётной оценки CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O.

*7 Разработка алгоритма оценки и методики прогнозирования возможных выгод и вреда от потери функциональности ОТИ, транспортных технологий и затрат на их адаптацию*

Методика предусматривает учет неопределенности исходных данных а также результаты сценарных прогнозов реализации адаптационных мероприятий, учитывающих прогнозируемое состояние климата, особенности конструкции ОТИ, транспортных информационно-коммуникационных технологий мониторинга и управления перевозочным процессом и технико-эксплуатационным состоянием ОТИ, новых материалов и технологий повышения живучести ОТИ и технологий, осуществить ее программную реализацию и провести апробацию на примере одного из северных регионов России. На завершающем этапе предполагается построение математической модели комплексной оценки и прогнозирования возможных выгод и вреда от потери функциональности ОТИ, систем организации и управления перевозочным процессом, выявления их адаптационных возможностей с учетом перечисленных выше факторов, ее программная реализация и апробация на примере одного из северных регионов России, оценка достоверности полученных результатов.

### 3. Заключение

В результате реализации указанных методологических принципов появляется возможность:

- комплексного исследования проблем, связанных с полной или частичной утратой функциональной (эксплуатационной) надежности транспортных объектов и логистических технологий в транспортных коридорах на территории распространения вечной мерзлоты при изменении климата;
- разработки методологии комплексной оценки позитивных и негативных экономических, энергетических, экологических, социальных эффектов от вероятных климатических изменений для транспортных объектов и технологий в транспортных коридорах на территории распространения вечной мерзлоты при изменении климата;
- исследования проблемы обеспечения заданного уровня функциональной (эксплуатационной) надежности и безопасности транспортных объектов и технологий при минимизации расходов на ее поддержание в связи с климатическими изменениями на территории распространения вечной мерзлоты, и выявлены экономически, энергетически, экологически, социально обоснованные пути сохранения требуемых уровней функциональности этих объектов и технологий;

- разработки экономически, энергетически, экологически, социально обоснованных сценариев адаптации объектов транспортных объектов и технологий в связи с климатическими изменениями на территории распространения вечной мерзлоты.

В итоге будет разработана методология оценки вероятности потери функциональности транспортных объектов и технологий, позитивных и негативных экономических, энергетических, экологических (экосистемных), социальных эффектов от климатических изменений и адаптационных мер для транспортных объектов и технологий, а также адекватных сценариев адаптации таких объектов и технологий к вероятным климатическим изменениям на территории распространения вечной мерзлоты.

## Список литературы

1. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Методы оценки рисков и мер по адаптации объектов транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям в криолитозоне: монография. М.: МАДИ, 2022. 162 с.
2. Аналитический доклад «О международном опыте разработки и внедрения принципов, мер и механизмов «зелёной» экономики, Департамент макроэкономической политики, 2022. <https://eec.eaunion.org/upload/medialibrary/b34/Doklad-zelenaya-ekonomika-06.2022.pdf> (дата обращения 19.01.2024).
3. Научно обоснованный прогноз адаптации сектора автомобильного транспорта к вероятным последствиям изменения климата и возможные сценарии его декарбонизации в Российской Федерации. ООО «Центр транспортных инноваций», Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2022. [https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/51d/fij7e385h3mi8eur6dg5si1hbolq9aeq/SKOLKOVO\\_EneC\\_RU\\_Transport.pdf](https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/51d/fij7e385h3mi8eur6dg5si1hbolq9aeq/SKOLKOVO_EneC_RU_Transport.pdf) (дата обращения 19.01.2024).
4. Воронцова С.Д. Влияние климатических изменений на транспортную инфраструктуру в Арктической зоне и на территориях распространения вечной мерзлоты // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2017. № 4 (71). <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-klimaticheskikh-izmeneniy-na-transportnuyu-infrastrukturu-v-arkticheskoy-zone-i-na-territoriyah-rasprostraneniya-vechnoy> (дата обращения 19.01.2024).