

Методика оценки риска утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней (вечной) мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями

Ю.В. Трофименко, заведующий кафедрой, профессор, д-р техн. наук,
А.Н. Якубович, профессор, д-р техн. наук

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

e-mail: ywtrofimenko@mail.ru

Ключевые слова:

эксплуатация автодорог,
риск нарушения функциональности,
вечномерзлые грунты,
изменение климата,
статистическое моделирование.

Риск утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней (вечной) мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями оценивается по величине надежности конструкции дороги с использованием действующих нормативных правовых документов. Количественная оценка риска утраты функциональности выполнена методами вероятностно-статистического моделирования для основных автодорог в зоне вечной мерзлоты. Показано, что в климатических условиях, характерных для криолитозоны России, увеличение температуры воздуха на 1 градус вызывает существенное возрастание риска утраты функциональности автодороги. Изменение контрастности температурного режима является вторым значимым фактором повышения риска.

1. Введение

Автомобильные дороги, расположенные в зонах наличия мерзлых и вечномерзлых грунтов, отличаются особым режимом эксплуатации, связанным со специфическими природно-климатическими условиями. Основным условием обеспечения достаточной функциональности автодороги выступает сохранение определенного постоянного температурного режима грунтов в основании земляного полотна, предусмотренного при ее проектировании и строительстве. Нарушение этого режима в процессе эксплуатации вследствие происходящих и прогнозируемых климатических изменений закономерно приводит к просадкам в основании земляного полотна дороги, и, как следствие, к чрезмерной деформации дорожного покрытия, существенно снижающим функциональность объекта транспортной инфраструктуры вплоть до полной её утраты [1, 2].

Изменение температурного режима вечномерзлых грунтов активизирует на придорожных террито-

риях такие неблагоприятные экологические процессы, как изменение уровня грунтовых вод, локальное заболачивание, деградация растительных комплексов и др. Это негативное влияние на экосистемы, отличающиеся уязвимостью и крайне медленными темпами их самовосстановления [3], по размеру вреда сопоставимо с утратой отдельными участками автодорог своей эксплуатационной функциональности [4]. Поэтому риск утраты эксплуатационной функциональности автодороги на территории криолитозоны неразрывно связан с сопутствующими экологическими рисками.

В настоящее время на значительных территориях криолитозоны России — $\frac{2}{3}$ площади территории Российской Федерации [11, 12] — наблюдается устойчивое повышение среднегодовой температуры грунтов [5, 6], с соответствующим увеличением глубины их сезонного оттаивания [7]. Прогнозируемые климатические изменения [8–10] приведут к закреплению этих тенденций, с одновременным повышением

всех видов рисков (строительных, эксплуатационных, экологических) для инфраструктурных объектов, расположенных в этой зоне.

Климатические параметры, характеризующие состояние климата, по своей объективной природе обладают вероятностным характером, и для их формализованного описания целесообразно использовать случайные процессы и величины. Такой подход, в частности, был успешно реализован при оценке рисков от чрезвычайных ситуаций природного характера на территории дорожной сети [13]. Эффективным, а во многих случаях и единственным инструментом количественного прогнозирования влияния природно-климатических факторов на линейные объекты транспортной инфраструктуры и элементы экосистем может быть имитационное и вероятностно-статистическое моделирование [14–17]. Результаты моделирования составляют основу для принятия управленческих решений, направленных на своевременное предупреждение или снижение риска в отношении техногенных и природных объектов. Выбор наиболее рационального перечня и объема инженерно-технических и организационных мероприятий, направленных на снижение риска, может осуществляться на основе оптимизационной модели с показателями в натуральной форме [18], с использованием прогнозируемых экономических показателей [19–20], иными способами [21]. Мероприятия, эффективно противодействующие неблагоприятному изменению теплового режима вечномерзлых грунтов и способствующие снижению эксплуатационного риска автомобильной дороги, рассмотрены в [22].

В настоящей работе представлена методика, позволяющая количественно оценивать риски снижения функциональности объектов транспортной инфраструктуры, в частности автомобильных дорог, расположенных на территориях распространения вечной мерзлоты, возникающие в результате возможных климатических изменений. Показаны содержание и последовательность детерминированного и вероятностного расчета, необходимого для оценки риска, приведены результаты прогнозной оценки риска, в том числе для наиболее важных автодорог на территории криолитозоны.

2. Теоретический анализ

Оценка риска утраты функциональности для объекта автотранспортной инфраструктуры производится на основе анализа соответствия текущего состояния требованиям норм расчета и проектирования, действующих в отношении рассматриваемого объекта. При этом для описания функциональности объек-

та используется показатель P , или группа показателей $\{P_1 \dots P_k\}$, определение которых составляет процесс проектирования объекта, и является его целью. Показатели функциональности — это геометрические, прочностные или деформационные характеристики объекта автотранспортной инфраструктуры. Перечень таких показателей функциональности индивидуален для каждого вида объектов и определяется содержанием соответствующих действующих норм проектирования (СП 35.13330.2011, СП 20.13330.2011, СП 131.13330.2012, СП 25.13330.2012, СП 34.13330.2012, ОДМ 218.0.084–2005 и др.). В качестве показателя функциональности для автомобильной дороги как инженерного сооружения принимается обеспечение надежности конструкции при определенной высоте насыпи H . В отношении инфраструктурных объектов другого вида могут использоваться величина прогиба автодорожного моста под максимальной нагрузкой f , наибольшая ширина раскрытия трещин в растянутых элементах железобетонной фермы $a_{ср}$ и др.

Объект, показатели функциональности которого полностью соответствуют требованиям действующих норм, характеризуется отсутствием риска частичной или полной утраты функциональности. Условие отсутствия риска имеет вид:

$$\{P_1 \in [P_1], \dots, P_k \in [P_k]\}, \quad (1)$$

где $[P_i]$ — область значений i -го показателя функциональности, допускаемая нормами расчета данного показателя. При отсутствии в нормах области допустимых значений она может назначаться экспертным путем.

Риск утраты функциональности объекта определяется на основе вероятности выхода одного или нескольких показателей функциональности объекта за пределы области допустимых значений. Для количественной оценки риска используется показатель R , связанный с такой вероятностью соотношением:

$$R = F[p(P \notin [P])], \quad (2)$$

где F — переходная функция от вероятности события (выхода значения показателя за допустимые границы) к единицам измерения риска. В простейшем случае, когда любой выход P из допустимой области означает единовременные и постоянные по величине расходы S на восстановление функциональности объекта, переходная функция для выражения риска в стоимостной форме имеет вид:

$$F(p) = S \cdot p. \quad (3)$$

В иных случаях, когда зависимость между фактами снижения или утраты функциональности и их проявлениями (например, вред людям, имуществу, окружающей среде) носит более сложный характер, необходимо строить соответствующую переходную функцию на основе статистических и прогнозных данных.

Возникновение риска утраты функциональности объекта связано с возможностью появления в процессе его эксплуатации на протяжении жизненного цикла (30–50 лет) воздействий, не предусмотренных при его проектировании, прежде всего климатических изменений. В результате некоторые показатели функциональности объекта в изменившихся условиях перестают соответствовать требованиям норм проектирования, что закономерно приводит к риску частичной или полной утраты объектами своей функциональности.

Риск утраты функциональности объекта определяется значениями параметров, характеризующих его физико-механические свойства (геометрические размеры, прочность материалов) и природно-климатические условия (ветровая и снеговая нагрузка, температурный режим грунтов основания и т. д.). Параметры объекта имеют вероятностную природу и формализуются, в общем случае, как случайные величины \tilde{z} с соответствующими законами распределения. Параметры, имеющие малую вариативность, могут рассматриваться как детерминированные величины. Количественное описание параметров объекта выполняется как по результатам инженерных изысканий, мониторинга, так и с использованием ранее накопленной или прогнозной информации о нагрузках, климатических показателях и т. д.

Определение показателей функциональности, соответствующих параметрам объекта и, следовательно, обеспечивающих отсутствие риска утраты функциональности (при неизменных значениях этих параметров), в общем случае имеет вид:

$$U(\{z_1, \dots, z_M\}) \rightarrow \{P_1, \dots, P_K\}, \quad (4)$$

где U — обобщенный оператор преобразования параметров объекта в показатели его функциональности, заложенный в нормах проектирования для рассматриваемого вида объектов. Численная реализация соотношения (4) представляет собой детерминированный расчет объекта, результатом которого будут значения показателей функциональности этого объекта.

В силу вероятностного характера некоторых параметров объекта, в первую очередь природно-климатических, связанные с ними соотношением (4)

показатели функциональности объекта также случайные величины. Их идентификация (определение законов распределения и параметров этих законов) производится по результатам вероятностного расчета характеристик функциональности объекта. При этом обобщенный оператор преобразования для случайных величин, аналогичный оператору U для детерминированных значений, как правило, в явном виде нельзя построить. Проведение вероятностного расчета в этих случаях выполняется методами статистического моделирования.

На *предварительном этапе* вероятностного расчета устанавливаются показатели функциональности P_i и влияющие на них параметры объекта z_k , отдельно выделяются климатические параметры. Производится формализованное описание параметров для текущего и прогнозного периодов, выполняемое в зависимости от особенностей методов оценки отдельных параметров на основе детерминированных или случайных величин. Осуществляется качественная интерпретация всего возможного диапазона значений показателей функциональности, устанавливаются предельные значения этих показателей $[P_i]$ на границе (границах) частичной или полной утраты функциональности объекта.

Первый этап вероятностного расчета заключается в построении обобщенного оператора преобразования U , используемого при детерминированном расчете. При наличии нескольких показателей функциональности обобщенный оператор U структурно состоит из соответствующего количества алгоритмов, по каждому из которых определяется один из используемых показателей функциональности. Построение U производится на основе норм проектирования и расчета, действующих в отношении рассматриваемого объекта автотранспортной инфраструктуры, в зависимости от его вида, использованных материалов, условий эксплуатации и т. д.

На *втором этапе* вероятностного расчета формируются N сочетаний параметров объекта. Детерминированные параметры входят во все сочетания со своими постоянными значениями. Параметр, формализуемый как случайная величина, представляется как выборка из N реализации данной величины; каждая реализация при этом входит в одно из сочетаний параметров. Каждое из сочетаний параметров объекта $Z^{(i)}$ может быть представлено в виде:

$$Z^{(i)} = \{z_1^{(i)}, \dots, z_M\}, \quad (5)$$

где: $z_1^{(i)}$ — i -я реализация случайной величины \tilde{z}_1 (первого параметра); z_M — детерминированное значение параметра M .

Третий этап вероятностного расчета заключается в выполнении N детерминированных расчетов (4), каждый со своим сочетанием параметров $Z^{(i)}$. Результатом расчета будут N значений для каждого показателя функциональности $\{P_i^{(1)}, \dots, P_i^{(N)}\}$, рассматриваемые как выборка из N реализации соответствующей случайной величины \tilde{P}_i .

На заключительном, четвертом этапе вероятностного расчета выполняется идентификация каждого показателя функциональности как случайной величины, для которой получена выборка N реализации, и по ней требуется определить закон распределения данной величины и числовые значения параметров этого закона. Идентификация выполняется стандартными методами математической статистики, среди которых во многих случаях наиболее целесообразно использовать кривые Пирсона. Итогом вероятностного расчета будут функции плотности вероятностей случайной величины (по числу принятых показателей функциональности объекта), представленных в виде $p^{(i)}(P)$, где P — возможное значение i -го показателя функциональности.

Наличие полностью идентифицированных зависимостей $p^{(i)}(P)$ дает возможность определить вероятность выхода каждого показателя функциональности за пределы области допустимых значений $p^{(i)}(P \notin [P^{(i)}])$, а значит, позволяет оценить риск утраты функциональности в соответствии с (2). При этом любое, в том числе незначительное изменение параметров объекта транспортной инфраструктуры (например, в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями), будет вызывать появление ненулевого риска нарушения его функциональности. Учитывая это обстоятельство, при практическом выявлении объектов, находящихся в зоне значимого риска и нуждающихся в проведении инженерно-технических мероприятий для снижения риска до безопасного уровня, целесообразно устанавливать для показателя риска R некоторые граничные значения $[R]$, описывающие область низких (приемлемых) уровней риска. Эти граничные значения определяются экспертным путем, а условие отнесения объекта к группе объектов, обладающих риском утраты функциональности, принимает вид:

$$R \notin [R]. \quad (6)$$

Устранение избыточного риска заключается в целенаправленном изменении некоторых параметров объекта, обеспечивающих его соответствие требованиям норм расчета в новых климатических условиях эксплуатации. В связи с многовариантностью задачи

по выбору изменяемых параметров целесообразно определять перечень и объем инженерно-технических мероприятий по снижению риска потери функциональности объектов транспортной инфраструктуры на основе требования:

$$\begin{aligned} S(Z, \Delta Z) &\rightarrow \min, \\ R(Z + \Delta Z) &\in [R], \end{aligned} \quad (7)$$

где: Z — множество текущих значений параметров объекта, вызывающих неприемлемо высокий риск утраты его функциональности $R(Z) \notin [R]$; ΔZ — множество возможных изменений параметров (обеспечиваемых за счет соответствующих инженерно-технических мероприятий); S — стоимость мероприятий, приводящих к изменению параметров ΔZ (при начальных значениях Z); $R(Z + \Delta Z)$ — показатель риска с учетом изменений ΔZ . Варьируемым (управляемым) показателем в (7) является ΔZ .

3. Практическая реализация

Поскольку алгоритм оценки риска предусматривает многократное выполнение однотипных расчетов по определению высоты насыпи автодороги при различных климатических условиях, получение численных результатов осуществлялось с использованием специально разработанной компьютерной программы. Исходные данные для расчета сгруппированы по трем информационным массивам — с описанием грунта в основании земляного полотна, климатическими параметрами, данными о технологиях, применяемых при строительстве автодороги. Температурный режим на территории описывался с помощью следующих показателей.

- Средняя по многолетним данным температура воздуха за период положительных температур $T_{th, m}$, °С. Определяется в зависимости от района строительства (для существующего природно-климатического режима) или на основании прогнозных данных (для изменяющегося климата). Основная климатическая характеристика, определяющая глубину сезонного оттаивания вечномерзлых грунтов и связанную с ней требуемую высоту насыпи автодороги.
- Средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур $T_{f, m}$, °С, определяемая по многолетним либо прогнозным данным. В настоящем исследовании принималось, что при прогнозировании изменения климата данный показатель функционально связан с предполагаемым значением $T_{th, m}$.

- Средняя по многолетним данным продолжительность периода положительных температур $t_{th,m}$, в часах или секундах. Определяется аналогично предыдущему климатическому показателю.
- Среднезимняя высота снегового покрова d_s . Данный параметр необходим для определения термического сопротивления снегового покрова, влияющего на расчетную среднегодовую температуру многолетнемерзлого грунта. При назначении данного параметра учитывались интенсивность выпадения осадков в холодное время года и явление снеговой адвекции.
- Среднезимняя плотность снегового покрова ρ_s , которая влияет на теплопроводность снегового покрова.

Программные элементы, используемые при расчете риска утраты функциональности автомобильной дороги, подразделяются на три группы. Программные элементы *первой группы* необходимы для выполнения детерминированного расчета с целью определить требуемую высоту насыпи при некотором фиксированном сочетании исходных параметров — грунтовых, климатических и технологических. Ко *второй группе* относятся функции, на основе которых организуется вероятностный расчет, т.е. на основе результатов множества детерминированных расчетов (различающихся значениями исходных климатических параметров) определяется изменение показателя риска в новых климатических условиях. *Третью группу* составляют вспомогательные функции, необходимые, в первую очередь, для организации доступа к данным, которые хранятся в сложно структурированных информационных массивах. Рассмотренное множество программных элементов и промежуточных информационных массивов является обобщенным оператором U преобразования данных согласно (4), где показателем функциональности автодороги выступает высота насыпи H .

На первом этапе вычислительного процесса выполнялась идентификация массива исходных данных. Параметры, являющиеся переменными величинами (могут принимать любые значения в определенных диапазонах), определяются на основе многолетних климатических данных, по результатам инженерно-геологических изысканий отдельных участков автодорог и с учетом имеющейся информации об организации строительных работ, с использованием имеющейся прогнозно-аналитической информации о вероятных климатических изменениях. Кроме того, фиксируются стабильные (табличные) данные, необходимые для расчета высоты насыпи при различных сочетаниях исходных параметров. Второй этап вычислительного процесса заключается в определении значений коэффициентов и по-

казателей, необходимых для вычисления глубины сезонного оттаивания грунта в основании земляного полотна и определении этой глубины. На третьем этапе определяется высота насыпи автодороги, соответствующая принятым на предыдущих этапах природно-климатическим данным.

На четвертом этапе вычислительного процесса выполняется вероятностный расчет.

Фиксируется N — количество реализации случайной величины $\tilde{T}_{th,m}$, необходимое для достоверного численного моделирования как ее самой, так и функционально зависящей от нее случайной величины \tilde{H} . С учетом предположения о нормальном распределении $\tilde{T}_{th,m}$ фиксируются значения двух параметров этого распределения — среднее значение $\bar{T}_{th,m}$ и коэффициент вариации $k_{th,m}$, отражающие текущий (базовый) температурный климатический режим. Определяются N реализации случайной величины $\tilde{T}_{th,m}$, представленных в виде множества значений $\{T_1, T_2 \dots T_N\}$; статистические характеристики этого множества (его среднее значение и коэффициент вариации) соответствуют $\bar{T}_{th,m}$ и $k_{th,m}$. Далее для прогнозного климатического режима фиксируются характеризующие его среднее значение температуры $\bar{T}_{th,m}^f$ и коэффициент ее вариации $k_{th,m}^f$, и на их основании также определяются N реализации $\{T_1^f, T_2^f \dots T_N^f\}$.

С использованием среднего значения температуры $\bar{T}_{th,m}$, по алгоритму, описанному на трех предыдущих шагах, определяется значение H_n , которое является нормативной высотой насыпи, соответствующей текущему (базовому) состоянию климата.

Для каждого значения из множества $\{T_1, T_2 \dots T_N\}$ определяется соответствующее ему значение высоты насыпи, в результате получаем множество значений $\{H_1, H_2 \dots H_N\}$. Формирование данного множества производится путем выполнения N независимых расчетов в соответствии с предыдущими этапами вычислительного процесса, где каждому расчету соответствует свое значение T_i и одинаковые для всех расчетов значения остальных исходных данных. Аналогичным образом из множества $\{T_1^f, T_2^f \dots T_N^f\}$ получаем функционально связанное с ним множество $\{H_1^f, H_2^f \dots H_N^f\}$, численно описывающее случайную величину \tilde{H} в изменившихся климатических условиях.

Определяется показатель риска в новых климатических условиях, построенный на основе (2) — коэффициент риска:

$$k_R = \frac{\sum_{H_n > H_i^f} (H_n - H_i^f)}{\sum_{H_n > H_i} (H_n - H_i)} \quad (8)$$

Необходимо отметить, что получаемое по (8) значение риска является относительной величиной. Она показывает, как изменяется риск утраты функциональности рассматриваемого участка автодороги при изменении температурного режима от первоначального (базового) уровня до прогнозного. Поскольку коэффициент риска в базовых климатических условиях для объекта (автодороги) равен 1, он не может быть использован для сравнения уровней риска разных объектов. Сравнительный анализ рисков различных объектов возможен только на основе дополнительных данных — сведений об объективно сложившихся для каждого сравниваемого объекта показателях, отражающих темпы снижения их функциональности (например, среднегодовых затрат на поддержание функциональности отдельных автодорог и их участков на нормативном уровне).

3. Результаты и их обсуждение

Программно реализованная методика риска утраты функциональности автомобильных дорог была апробирована для отдельных сочетаний природно-климатических параметров. Во-первых, особый интерес представляли территории расположения наиболее важных автомобильных дорог (из числа возводимых на вечномёрзлых и мёрзлых грунтах). К ним относятся такие дороги и их участки, как Колыма — Омсукчан — Омолон — Анадырь, Сыктывкар — Ухта — Печора — Усинск — Нарьян-Мар (с подъездами к Воркуте), Сургут — Салехард (участок Надым — Салехард), трасса «Амур» Чита — Хабаровск (в границах Забайкальского края и Амурской области). Во-вторых, общие тенденции влияния температурных параметров на темпы утраты функциональности автомобильных дорог наиболее ярко проявляются при экстремальных значениях этих параметров. Это характерно, например, для Верхоянска (одно из самых

низких на территории России значений средней температуры в период отрицательных температур) или Хатанги (экстремально большая продолжительность периода отрицательных температур в течение года).

Результаты расчета риска утраты функциональности автодорог, проектируемых по принципу 1 (сохранение вечномёрзлых грунтов в основании земляного полотна в течение периода эксплуатации дороги), при повышении средней температуры воздуха на величину до 1°C показаны на рис. 1.

Рассматривалось сооружение дорожной насыпи из крупнозернистого песка. Можно видеть нелинейно ускоренный рост риска с повышением средней температуры воздуха. Минимальное значение k_R при $\Delta T = +1^\circ\text{C}$ прогнозируется для территории Читы и Вилюйска и составляет около 2,2; наибольшее значение ($k_R = 2,93$) по результатам расчетов зафиксировано для территории Сыктывкара. При определении коэффициента риска параметры грунта в основании земляного полотна не оказывали на него влияния, поскольку проектирование дороги по принципу 1 гарантирует их сохранение в мерзлом состоянии. Сравнительный анализ влияния температурных параметров климата на риск показывает, что наибольшему риску подвержены участки дорог, расположенные на территории с более низкими средними положительными температурами $T_{th,m}$; величина средней отрицательной температуры $T_{f,m}$, напротив, не оказывает заметного влияния на риск снижения функциональности.

При проектировании автодороги по принципу 2 (обеспечение допустимых деформаций при частичном оттаивании мерзлого грунта в основании земляного полотна на глубину, определяемую расчетом) параметры грунтов основания начинают влиять на величину риска от температурных изменений, хотя зависимость k_R от типа грунта (в условиях средней влажности) не превышает 3–5% (рис. 2).

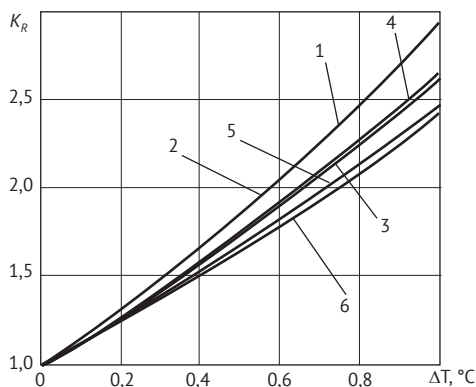


Рис. 1. Коэффициент риска при проектировании автодороги по принципу 1: автодорога Сыктывкар (1) — Ухта (3) — Печора (2) — Усинск (6) — Нарьян-Мар (4) с подъездами к Воркуте (5)

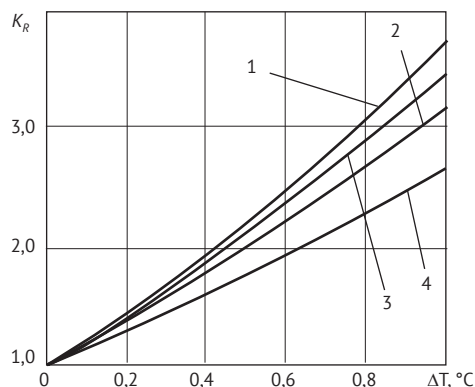


Рис. 2. Коэффициент риска при проектировании автодороги по принципу 2 (глинистый грунт): Сыктывкар (1), Хатанга (2), Омсукчан (3), Чита (4)

Влияние технологических параметров строительства (наличие предварительного оттаивания и осушения грунта, наличие в составе насыпи геотекстильной прослойки, летний или зимний период строительства) на величину k_R составляет 1–2%. Это объясняется тем, что каждый из этих технологических параметров, изменяя среднее значение случайной величины \tilde{H} , примерно на такое же значение изменяет и нормативную высоту насыпи H_n . В результате разность между реализацией \tilde{H} и H_n при варьировании основными технологическими параметрами строительства остается практически неизменной, что приводит к слабой чувствительности от них коэффициента риска k_R .

Наличие засоления грунтов основания (в отличие от его типа — морского или континентального) также оказывает значимое влияние на риск при температурных изменениях климата на стадии эксплуатации автодороги, запроектированной по принципу 2 (рис. 3).

При этом степень засоленности, характерная для слабозасоленных грунтов, не оказывает серьезного влияния на риск при изменении температурных условий. Весьма значима для этого вида грунтов, с точки зрения влияния на риск, продолжительность периода отрицательных температур. Анализ результатов моделирования показывает, что при сокращении среднегодовой продолжительности этого периода с 6000 часов (что примерно соответствует территории Воркуты или Волочанки) до 4500 часов (близко к климатическим условиям Сургута или Читы) коэффициент риска может возрасти более чем на 30%. Это объясняется тем, что одновременно с сокращением зимнего периода возрастает период положительных температур, а значит, более вероятным становится увеличение глубины сезонного оттаивания грунтов в основании земляного полотна, что,

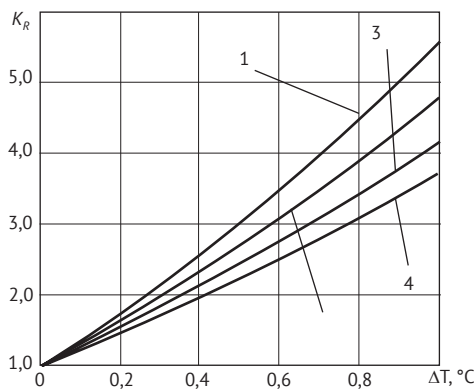


Рис. 3. Коэффициент риска при наличии засоления грунтов (проектирование автодороги по принципу 2, $t_{f,m} = 4500$ часов): 1 — $T_{th,m} = 5$ °C, 2 — $T_{th,m} = 6$ °C, 3 — $T_{th,m} = 7$ °C, 4 — $T_{th,m} = 8$ °C

несомненно, повышает риск утраты функциональности. Вторым значимым фактором, как и для дорог, проектируемых по первому принципу, является средняя летняя температура; по мере ее увеличения риск снижается, поскольку относительное влияние одного градуса потепления становится меньше. Районы с температурой $T_{th,m}$ ниже 6–7 °C относятся к зонам повышенного риска при температурных климатических изменениях.

Помимо изменения температуры воздуха, заметное влияние на риск утраты функциональности автомобильных дорог может оказать изменение *вариативности температурного режима* (контрастности климата) на территории. Вариант прогноза, когда одновременно с изменением (повышением) температуры увеличивается разброс ее возможных значений в течение ряда лет (что при моделировании учитывается как увеличение коэффициента вариации для случайных величин $\tilde{T}_{th,m}^f$ и $\tilde{T}_{f,m}^f$), для автодорог, запроектированных по принципу 1, показан на рис. 4.

Сравнительный анализ приведенных результатов с результатами на рис. 1 показывает существенное возрастание коэффициента риска. Это объясняется повышенной вероятностью появления с ростом вариативности значений температуры их аномально высоких значений, с аномально большими сезонными глубинами оттаивания насыпи и проникновением протаивания грунтов в основание земляного полотна. Увеличение вероятности таких процессов закономерно приводит к повышению риска утраты функциональности автодороги; коэффициент риска при повышении температуры на 1 °C начинает устойчиво превышать значение $k_R = 3$. В то же время возможное понижение контрастности среднегодового температурного режима ожидаемо будет способствовать понижению риска, что сможет (до определенной

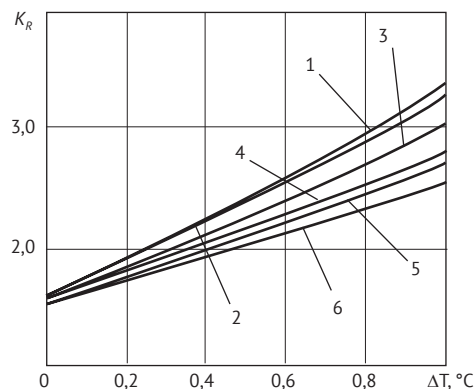


Рис. 4. Коэффициент риска при повышении контрастности температурных климатических параметров для разных территорий криолитозоны России (возведение автодороги по принципу 1): Хатанга (1), Волочанка (2), Дудинка (3), Игарка (4), Верхоянск (5), Вилюйск (6)

степени) компенсировать неблагоприятные последствия при одновременном повышении температуры.

Особенностью результатов, приведенных на рис. 4, является отличное от 1 значение коэффициента риска при $\Delta T = 0$, т. е. при сохранении текущей средней температуры воздуха, но при проявлении ее значений в более широком диапазоне. Влияние контрастности температурного режима на риск утраты функциональности автомобильных дорог, запроектированных по принципу 2, показано на рис. 5.

Изменение коэффициента риска под совместным влиянием изменения температуры и ее вариативности зависит от конкретных климатических параметров территории, при сохранении общей тенденции к понижению риска с уменьшением этой вариативности и его возрастанию с ростом контрастности температурного режима. При этом по мере увеличения ΔT вклад вариативности температуры в изменение коэффициента риска падает, в некоторых случаях уже при $\Delta T = +1$ °С вариативность температуры становится (с точки зрения риска) незначительной.

Заключение

Разработана методика, позволяющая проводить количественную оценку риска утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями. В результате расчетных исследований установлено, что величина риска потери функциональности дороги достаточно большая даже в диапазоне возможных климатических изменений (изменение температуры воздуха не превышает 1 °С). Это обстоятельство должно учитываться при проведении реконструкции или ремонта дорог путем реализации соответствующих мероприятий инженерной защиты.

Литература

1. Дроздов В.В., Шабуров С.С. Причины возникновения деформаций автомобильных дорог и мероприятия по снижению их интенсивности с высокотемпературным типом вечной мерзлоты в основаниях земляного полотна на примере строительства автомобильной дороги «Амур» Чита — Хабаровск // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015; 2: 33–45.
2. Бедрин Е.А., Дубенков А.А. Анализ причин сверхнормативных деформаций на автомобильных дорогах в условиях высокотемпературной мерзлоты (по результатам мониторинга автомобильной дороги «Амур») // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014; 3: 48–52.
3. Якубович А.Н. Прогнозирование периодов восстановления природных комплексов, нарушенных при про-

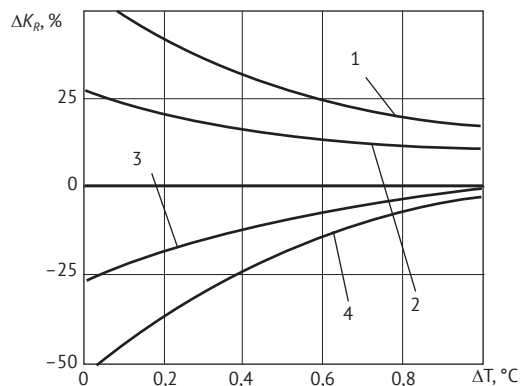


Рис. 5. Изменение коэффициента риска в зависимости от контрастности температурных климатических параметров на примере территории Омсукчана (возведение автодороги по принципу 2): 1 — повышение контрастности на 50 %, 2 — повышение контрастности на 25 %, 3 — понижение контрастности на 25 %, 4 — понижение контрастности на 50 %

На величину риска потери функциональности существенно влияют природно-климатические условия на территории и конструкция дороги. Это обуславливает необходимость индивидуального определения уточненного коэффициента риска для конкретного участка автодороги (на основе результатов проведения инженерно-геологических и других видов инженерных изысканий), что будет способствовать оптимизации состава и объема мероприятий по поддержанию функциональности дорог на требуемом уровне при прогнозируемых климатических изменениях. Представляется, что аналогичные выводы справедливы и для других объектов транспортной инфраструктуры, возводимых на территориях распространения мерзлых и вечномерзлых грунтов.

изводстве горных работ // Естественные и технические науки. 2009; 2: 232–236.

4. Якубович И.А., Якубович А.Н. Оценка экологического вреда растительным комплексам Магаданской области при формировании сети временных автодорог // Автотранспортное предприятие. 2012; 3: 49–52.
5. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Широков Р.С., Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны прибрежно-морской области Западного Ямала при изменении климата // Криосфера Земли. 2011; XV, 2: 56–64.
6. Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли. 2008; XII, 2: 10–18.

7. Куликов А.И., Куликов М.А., Смирнова И.И. О глубине протаивания почв при изменении климата // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2009; 1: 121–126.
8. Кириллина К.С., Лобанов В.А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015; 38: 137–151.
9. Киктев Д.Б., Секстон Д.М., Александер Л.В., Фолланд К.К. Тренды в полях годовых экстремумов осадков и приземной температуры во второй половине XX века // Метеорология и гидрогеология. 2002; 11: 13–24.
10. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. — М.: Изд-во ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. — 195 с.
11. Цаликов Р.Х. Опасности и угрозы для северных территорий Российской Федерации, обусловленные глобальным изменением климата // Обеспечение комплексной безопасности северных регионов Российской Федерации. Материалы научно-практической конференции. Москва, 22 апреля 2008 г. — М.: Изд-во НЦУКС МЧС России, 2008. — С. 8–25.
12. Трофимова И.Е., Макаров С.А., Балыбина А.С., Опекунова М.Ю. Геокриологические риски при современных изменениях климата и техногенных воздействиях на природу // Криосфера Земли. 2010; XIV, 3: 61–68.
13. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Методика прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на сети автомобильных дорог // Безопасность в техносфере. 2015; 2: 73–82.
14. Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Использование геоимитационного моделирования для прогноза изменения размеров термокарстовых озер на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016; XX, 2: 32–40.
15. Якубович А.Н., Якубович И.А., Рассоха В.И. Концептуальные основы моделирования самовосстановления экосистем Крайнего Северо-Востока России, нарушенных при сооружении временных автодорог // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012; 10: 182–186.
16. Судаков И.А., Бобылёв Л.П., Береснев С.А. Моделирование термического режима вечной мерзлоты при современных изменениях климата // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2011; 1: 81–88.
17. Анисимов О.А. Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонного слоя в условиях современного и будущего климата // Криосфера Земли. 2009; XIII, 3: 36–44.
18. Якубович А.Н., Шек В.М. Управление освоением горнопромышленной территории на основе результатов геомоделирования самовосстановительных процессов природных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009; 2, 12: 457–463.
19. Трофименко Ю.В., Медведева О.Е., Артеменков А.В., Медведев П.В. Методика оценки эколого-экономической эффективности проектов в сфере дорожного строительства // Безопасность в техносфере. 2015; 4, 4: 56–68.
20. Артеменков А.И., Медведева О.Е., Медведев П.В., Трофименко Ю.В. Оценка общественной (эколого-экономической) эффективности транспортных проектов в России // Вестник Финансового университета. 2015; 4: 45–56.
21. Цыцура А.А., Нечитайло О.Н. Разработка имитационной модели управления экологической безопасностью // Экология и промышленность в России. 2007; 5: 40–42.
22. Пасек В.В., Вербух Н.Ф., Пасков М.В., Палавошев И.Н., Андреев В.С. Стабилизация температурного режима насыпей в районах вечной мерзлоты // Путь и путевое хозяйство. 2015; 10: 28–30.

REFERENCES

1. Drozdov V.V., Shaburov S.S. Prichiny vozniknoveniya deformatsiy avtomobil'nykh dorog i meropriyatiya po snizheniyu ikh intensivnosti s vysokotemperaturnym tipom vechnoy merzloty v osnovaniyakh zemlyanogo polotna na primere stroitel'stva avtomobil'noy dorogi Amur «Chita — Khabarovsk» [Causes of deformation of roads and measures to reduce their intensity with a high type of permafrost in the grounds of the roadbed on the example of the construction of the highway Amur "Chita — Khabarovsk"]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* [Proceedings of the universities. Investitsii. Stroitel'stvo. The property]. 2015; pp. 33–45 (in Russian).
2. Bedrin E.A., Dubenkov A.A. Analiz prichin sverkhnormativnykh deformatsiy na avtomobil'nykh dorogakh v usloviyakh vysokotemperaturnoy merzloty (po rezul'tatam monitoringa avtomobil'noy dorogi «Amur») [Analysis of the causes of excessive strain on the roads in the conditions of high temperature permafrost (the results of the monitoring of the road "Amur")]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy]. 2014; pp. 48–52 (in Russian).
3. Yakubovich A.N. Prognozirovanie periodov vosstanovleniya prirodnykh kompleksov, narushennykh pri proizvodstve gornyx rabot [Prognozirovanie periods of restoration of natural complexes disturbed by mining operations]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences]. 2009; pp. 232–236 (in Russian).
4. Yakubovich I.A., Yakubovich A.N. Otsenka ekologicheskogo vreda rastitel'nykh kompleksam Magadanskoj oblasti pri formirovaniy seti vremennykh avtodorog [Otsenka environmental damage vegetation complexes

- of the Magadan region in the formation of a network of temporary roads]. *Avtotransportnoe predpriyatie* [transport enterprise]. 2012, pp. 49–52 (in Russian).
5. Vasil'ev A.A., Streletskaya I.D., Shirokov R.S., Oblogov G.E. Evolyutsiya kriolitozony pribrezhno-morskoy oblasti Zapadnogo Yamala pri izmenenii klimata [The evolution of the permafrost zone of coastal marine area of Western Yamal under climate change]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere Earth]. 2011, pp. 56–64 (in Russian).
 6. Vasil'ev A.A., Drozdov D.S., Moskalenko N.G. Dinamika temperatury mnogoletnemerzlykh porod Zapadnoy Sibiri v svyazi s izmeneniyami klimata [Dynamics of permafrost rocks in Western Siberia temperatures due to climate change]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere Earth]. 2008, pp. 10–18 (in Russian).
 7. Kulikov A.I., Kulikov M.A., Smirnova I.I. O glubine protaivaniya pochv pri izmenenii klimata [The depth of thawing of the soil to climate change]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy. VR Filippova]. 2009; pp. 121–126 (in Russian).
 8. Kirillina K.S., Lobanov V.A. Otsenka sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy temperatury vozdukha na territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) [Otsenka current climatic changes in air temperature on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University]. 2015, pp. 137–151 (in Russian).
 9. Kiktev D.B., Sekston D.M., Aleksander L.V., Folland K.K. Trendy v polyakh godovykh ekstremumov osadkov i prizemnoy temperatury vo vtoroy polovine XX veka [Trendy extrema in the fields of annual precipitation and surface temperature in the second half of the XX century]. *Meteorologiya i gidrogeologiya* [Meteorology and hydrology]. 2002, pp. 13–24 (in Russian).
 10. Gruza G.V., Ran'kova E. Ya. *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukha* [The observed and expected climate change Russia: Temperature vozduha]. Moscow, FGBU «VNIIGMI-MTsD» Publ., 2012. 195 p. (in Russian).
 11. Tsalikov R. Kh. Opasnosti i ugrozy dlya severnykh territoriy Rossiyskoy Federatsii, obuslovlennye global'nym izmeneniem klimata [The risks and threats to the northern territories of the Russian Federation, due to global climate change]. *Obespechenie kompleksnoy bezopasnosti severnykh regionov Rossiyskoy Federatsii. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Provision of complex safety of the northern regions of Russia. Proceedings of the conference]. Moscow, NTsUKS MChS Rossii Publ., 2008, pp. 8–25 (in Russian).
 12. Trofimova I.E., Makarov S.A., Balybina A.S., Opekunova M. Yu. Geokriologicheskie riski pri sovremennykh izmeneniyakh klimata i tekhnogennykh vozdeystviyakh na prirodu [Geocryological risks in today's climate and anthropogenic impacts on nature]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere Earth]. 2010, pp. 61–68 (in Russian).
 13. Trofimenko Yu.V., Yakubovich A.N. Metodika prognozirovaniya riskov chrezvychaynykh situatsiy prirodno kharaktera na seti avtomobil'nykh dorog [Methods of predicting the risk of emergency situations of natural character to the road network]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2015, pp. 73–82 (in Russian).
 14. Polishchuk Yu.M., Polishchuk V. Yu. Ispol'zovanie geoimitatsionnogo modelirovaniya dlya prognoza izmeneniya razmerov termokarstovykh ozer na severe Zapadnoy Sibiri [Using geoimitatsionnogo modeling for resizing forecast thermokarst lakes in the north of Western Siberia]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere Earth]. 2016, pp. 32–40 (in Russian).
 15. Yakubovich A.N., Yakubovich I.A., Rassokha V.I. Kontseptual'nye osnovy modelirovaniya samovosstanovleniya ekosistem Kraynego Severo-Vostoka Rossii, narushennykh pri sooruzhenii vremennykh avtodorog [Conceptual bases of self-healing ecosystem modeling of the Extreme Northeast of Russia disturbed during construction of temporary roads]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2012, pp. 182–186 (in Russian).
 16. Sudakov I.A., Bobylev L.P., Beresnev S.A. Modelirovanie termicheskogo rezhima vechnoy merzloty pri sovremennykh izmeneniyakh klimata [Modelling of the thermal regime of permafrost under present climate]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya* [Bulletin of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography]. 2011, pp. 81–88 (in Russian).
 17. Anisimov O.A. Veroyatnostno-statisticheskoe modelirovanie moshchnosti sezonnotalogo sloya v usloviyakh sovremennogo i budushchego klimata [Probability-statistical modeling of power-Layer under current and future climate]. *Kriosfera Zemli* [Cryosphere Earth]. 2009, pp. 36–44 (in Russian).
 18. Yakubovich A.N., Shek V.M. Upravlenie osvoeniem gornopromyshlennoy territorii na osnove rezul'tatov geomodelirovaniyasamovosstanovitel'nykh protsessov prirodnykh kompleksov [Upravlenie development of mining areas based on the results geomodelirovaniyasamovosstanovitel'nyh processes of natural systems]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mountain information-analytical bulletin]. 2009, pp. 457–463 (in Russian).
 19. Trofimenko Yu.V., Medvedeva O.E., Artemenkov A.V., Medvedev P.V. Metodika otsenki ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti proektov v sfere dorozhnogo stroitel'stva [Metodika assessment of environmental and economic efficiency of the projects in the field of road construction]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2015, pp. 56–68 (in Russian).

20. Artemenkov A.I., Medvedeva O.E., Medvedev P.V., Trofimenko Yu.V. Otsenka obshchestvennoy (ekologiko-ekonomicheskoy) effektivnosti transportnykh proektov v Rossii [Otsenka public (environmental and economic) efficiency of transportation projects in Russia]. *Vestnik finansovogo universiteta* [Financial University Bulletin]. 2015, pp. 45–56 (in Russian).
21. Tsytura A.A., Nechitaylo O.N. Razrabotka imitatsionnoy modeli upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu [Development of a simulation model of environmental control]. *Ekologiya i promyshlennost' v Rossii* [Ecology and Industry in Russia]. 2007, pp. 40–42.
22. Passek V.V., Verbukh N.F., Paskov M.V., Palavoshev I.N., Andreev V.S. Stabilizatsiya temperaturnogo rezhima nasypey v rayonakh vечноy merzloty [The stabilization of the temperature regime of embankments in permafrost regions]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [path and track facilities]. 2015, pp. 28–30 (in Russian).

Method for Assessment of Risk of Auto-Roads' Functionality Loss in Territories of Long-Term (Eternal) Permafrost in Connection with Projected Climatic Changes

Yu.V. Trofimenko, Doctor of Engineering, Professor, Head of Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

A.N. Yakubovich, Doctor of Engineering, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

The risk of auto-roads' functionality loss in the territories of the long-term (eternal) permafrost in connection with predicted climatic changes is estimated on road structure's reliability value with use of the existing regulating legal documents. The quantitative risk assessment of functionality loss has been carried out by methods of probabilistic and statistical simulation for the main auto-roads in permafrost zone. It has been shown that in the climatic conditions typical for Russia's cryolithic zone, increase in air temperature by 1 degree causes an essential increase of risk for an auto-road's functionality loss. Temperature regime's contrast change is the second significant factor influencing the risk.

Keywords: operation of auto-roads, functionality violation risk, permafrost soils, climate change, statistical simulation.

Минобрнауки России поддержит в 2017 году свыше 440 научных проектов вузов

Определены победители конкурсного отбора научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации.

Из более 2500 заявок Комиссия Министерства при активном участии Совета по науке при Минобрнауки России и Проектного офиса НТИ отобрала 444 проекта 125 организаций.

Полный список отобранных проектов, которые будут поддержаны в 2017 году в рамках государственного задания, опубликован и доступен на официальном сайте Министерства. На поддержку всех проектов выделено 2,9 млрд рублей.

Проекты нацелены на достижение результатов по широкому спектру направлений, среди которых исследования физико-химических процессов, разработка инновационного программного обеспечения, проекты по биоинженерии, нейрорегулируемой робототехнике и др.

Источник информации: Минобрнауки России

В Сочи откроют первые зарядные станции для электромобилей

Сеть специальных зарядных станций Supercharger для электромобилей собирается открыть в Сочи американская компания Tesla. Первые станции могут появиться на российском курорте уже в 2017–2018 годах. Также ожидаются аналогичные площадки в Москве, Санкт-Петербурге, Казани и Самаре, на некоторых транспортных магистралях. В настоящее время специалисты Tesla подыскивают наиболее выгодные места для их строительства. Среднее время зарядки на станции будет около 40 минут — до 80%, чтобы машина могла доехать до следующей станции.

Источник информации: GreenEvolution