



МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

Ю.В. ТРОФИМЕНКО, А.Н. ЯКУБОВИЧ

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ И МЕР  
ПО АДАПТАЦИИ ОБЪЕКТОВ  
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ**

В печать  
Проректор по научной работе

М.Ю. Карелина

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

Ю.В. ТРОФИМЕНКО, А.Н. ЯКУБОВИЧ

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ И МЕР  
ПО АДАПТАЦИИ ОБЪЕКТОВ  
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ

МОНОГРАФИЯ

МОСКВА  
МАДИ  
2022

УДК 656:624.139  
ББК 39:38.581.252  
Т760

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, доц., директор Института транспортного  
планирования Общероссийской общественной организации  
«Российская академия транспорта» *М.Р. Якимов*;

**Трофименко, Ю.В.**

Т760 Методы оценки рисков и мер по адаптации объектов транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям в криолитозоне: монография / Ю.В. Трофименко, А.Н. Якубович. – М.: МАДИ, 2022. – 162 с.

ISBN 978-5-7962-0290-6

Монография посвящена вопросам моделирования климатических изменений в криолитозоне, температурной динамики грунтов в основании объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) автомобильного, железнодорожного, водного и воздушного транспорта, прогнозирования рисков снижения функциональности (климатических рисков) объектов инфраструктуры в результате изменения температуры воздуха, вызывающей изменение температуры грунтов оснований ОТИ. По результатам математического моделирования обосновываются мероприятия по адаптации ОТИ к климатическим изменениям для разных видов транспорта.

Монография рекомендуется для использования широким кругом специалистов, занимающихся вопросами проектирования, эксплуатации, ремонта объектов транспортной инфраструктуры на территориях расположения многолетнемерзлых грунтов. Она будет полезна представителям органов власти, бизнес-сообщества, научным сотрудникам, преподавателям вузов, студентам, аспирантам, проявляющим интерес к развитию транспортных коммуникаций в Арктической зоне России.

УДК 656:624.139  
ББК 39:38.581.252

ISBN 978-5-7962-0290-6

© МАДИ, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>Основные обозначения.....</b>	<b>8</b>
<b>Глава 1. Базовые положения процедуры оценки климатических рисков в отношении транспортных инфраструктурных объектов .....</b>	<b>9</b>
1.1. Климатические изменения на территории криолитозоны как фактор риска.....	9
1.2. Смысловое содержание основных терминов .....	15
1.3. Уровни расчета при количественной оценке рисков и структурные элементы методики расчета ...	20
1.4. Содержание процедуры оценки климатических рисков и ее основные этапы .....	25
1.5. Особенности процедуры оценки рисков в зависимости от вида объектов транспортной инфраструктуры .....	32
<b>Глава 2. Моделирование климатических изменений в криолитозоне .....</b>	<b>37</b>
2.1. Характеристика состояния климата на основе данных, соответствующих среднестатистическому году.....	37
2.2. Климатические параметры, влияющие на температурный режим вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов .....	43
2.3. Вероятные сценарии климатических изменений и их формализованное описание .....	47
<b>Глава 3. Моделирование температурной динамики грунта в основании объектов транспортной инфраструктуры .....</b>	<b>54</b>
3.1. Моделирование теплофизических параметров грунта .....	54
3.2. Моделирование теплообмена между грунтовым массивом и окружающей средой .....	58

3.3. Программная реализация процедуры моделирования температурного режима грунта .....	64
3.4. Сравнительный анализ результатов моделирования .....	70
<b>Глава 4. Прогнозирование рисков снижения функциональности инфраструктурных объектов криолитозоны России .....</b>	<b>76</b>
4.1. Принятые сценарии климатических изменений и модели риска.....	76
4.2. Оценка рисков объектам транспортной инфраструктуры при повышении контрастности климата .....	82
4.3. Оценка рисков объектам транспортной инфраструктуры при повышении среднегодовой температуры воздуха .....	94
4.4. Оценка рисков объектам транспортной инфраструктуры при одновременном потеплении и повышении контрастности климата.....	106
<b>Глава 5. Меры по адаптации инфраструктурных объектов криолитозоны к климатическим изменениям .....</b>	<b>119</b>
5.1. Конструкции для защиты температурного режима грунта от климатических изменений.....	119
5.2. Анализ изменения температурного режима вечномёрзлых грунтов в результате реализации инженерно-технических мероприятий по снижению климатических рисков ....	123
5.3. Влияние природно-климатических и конструктивных факторов на величину снижения климатических рисков .....	133
<b>Заключение .....</b>	<b>150</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>150</b>

## Введение

По мнению многих зарубежных и отечественных экспертов существуют следующие риски, связанные с текущим и ожидаемым изменением климата [71]:

- 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 °C 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).

Указанные риски могут приводить к полной или частичной утрате функциональности объектов транспортной инфраструктуры, расположенных в зоне вечной мерзлоты, местах карстовых проявлений, местах потенциального затопления и подтопления, сейсмически и оползнеопасных районах [25].

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 иницируются постепенно (в течение десятилетий) по мере изменения климатических параметров.

По нашему мнению, особенно сильно будет влиять на живучесть транспортных сооружений таяние вечной мерзлоты.

Последствия таяния многолетней мерзлоты и возникновения опасных природных явлений обуславливают увеличение рисков разрушения автомобильных и железных дорог, ухудшение состояния взлетно-посадочных полос аэродромов, портовых стенок на реках в результате того, что:

- происходит ускоренное старение и уменьшение долговечности ограждающих конструкций зданий и сооружений;
- возникают негативные эффекты от совместного воздействия ветровых нагрузок, температурных деформаций и коррозионного разрушения;
- частые перепады температуры зимой и большое число дней с экстремально высокими температурами воздуха летом способствуют ускоренному разрушению покрытия автомобильных дорог, разрушению мостов и путепроводов;
- рост количества и интенсивности осадков летом увеличивает риски возникновения опасных последствий, связанных с потерей устойчивости склонов – оползней, лавин и повышает вероятность размыва насыпей автомобильных и железных дорог;
- увеличивается интенсивность и повторяемость осадков, дождевых паводков в ряде регионов (Северный Кавказ, Дальневосточное Приморье);
- сокращается период эксплуатации зимников и ледовых переправ.

В данной работе рассмотрены методы оценки рисков и эффективности мер по адаптации объектов транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям в криолитозоне.

Монография состоит из пяти глав. В первой главе рассмотрены базовые положения разработанного методического подхода, процедуры оценки климатических рисков ОТИ. Выполнен анализ влияния климатических изменений на живучесть ОТИ, приводятся основные термины и определения, а также методы кластеризации климатических рисков – рисков частичного или полного разрушения ОТИ разных видов транспорта в результате изменения климата. Во второй главе приводится обзор моделей оценки климатических изменений в криолитозоне. Рассмотрены характеристики и показатели состояния климата, приведены сценарии возможных климатических изменений. В третьей главе рассмотрены процессы температурной динамики грунтов оснований объектов транспортной инфраструктуры – теплофизические показатели грунта, теплообмен грунтового массива с атмосферным воздухом, основные положения компьютерной программы, описывающей эти процессы, а также результаты вычислительных экспериментов. В четвертой главе приведены результаты сценарных прогнозов оценки климатических рисков – рисков потери функциональности ОТИ при изменении контрастности климата и повышении среднегодовой температуры воздуха. В пятой главе рассмотрены меры по адаптации ОТИ к климатическим изменениям, конструкции объектов и технологии стабилизации температурного режима грунтов оснований, а также выполнен факторный анализ влияния мер защиты на уровень климатических рисков для ОТИ.



## Основные обозначения

- $c$  – параметры состояния климата, количественно характеризующие погодные условия на протяжении одного среднестатистического года;
- $d$  – расстояние между соседними сезонно-охлаждающими устройствами, м;
- $D$  – величина негативных последствий как следствие недостаточной функциональности объекта, выраженная в стоимостной или натуральной форме;
- $e$  – относительная осадка оттаивающего грунта;
- $h_{\text{melt}}$  – осадка оттаивающего грунта, м;
- $R$  – риск климатических изменений;
- $T_{\text{в}}$  – температура воздуха, °C;
- $T_{\text{bf}}$  – температура замерзания грунта, °C;
- $Q$  – количество тепла, передаваемое между соседними расчетными элементами грунтового массива при моделировании теплообмена, Дж;
- $u$  – характеристика функциональности объекта ( $0 \leq u \leq 1$ );
- $v_{\text{в}}$  – скорость ветра в приземном слое воздуха, м/с;
- $V$  – динамика состояния окружающей среды объекта на протяжении среднестатистического года;
- $\alpha$  – коэффициент рассеивания напряжений в грунте;
- $\delta$  – критериальный показатель функциональности объекта;
- $\tau_{\text{с}}$  – предполагаемое изменение контрастности климата вследствие продолжающихся климатических изменений, °C;
- $\tau_{\text{т}}$  – предполагаемое изменение температуры воздуха вследствие продолжающихся климатических изменений, °C;
- $\Delta_{x/y/z}$  – пространственное разрешение модели (высота расчетного элемента грунтового массива) по оси  $x$ ,  $y$  или  $z$ , м.

## **Глава 1. БАЗОВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В ОТНОШЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

### **1.1. Климатические изменения на территории криолитозоны как фактор риска**

Глобальные климатические изменения оказывают значительное влияние на все аспекты жизнедеятельности человека. Современное глобальное потепление характеризуется систематическим повышением температуры атмосферного воздуха практически на всей территории Земли [7]. Согласно прогнозам, среднее повышение температуры воздуха в 2030 году составит в среднем 1.41 градус по Цельсию, а к 2100 году достигнет величины 3.17 градусов по Цельсию [84]. На территории всей канадской Арктики наблюдаемая температура воздуха возрастала как минимум 40 последних лет, причем это потепление имело место во все времена года [49]; ожидается, что темпы потепления в Арктике будут превышать среднемировые показатели примерно в три раза [60]. Спутниковые наблюдения за 1984-2004 годы показали, что среднегодовая температура поверхности в Арктических регионах возрастает со скоростью 0.34 градуса за десятилетие [85]. При несомненном тренде на потепление температурный режим практически на всех территориях Северного полушария отличается значительными аномалиями и контрастами, практически в каждом месяце 2018 года отмечалось наличие крупных и интенсивных аномалий обоих знаков; общее число отрицательных аномалий (локальное похолодание) возросло, по сравнению с 2017 годом, в 2,5-3 раза [56].

В [76] показано, что за период 1995-2011 гг. толщина активного слоя почвы увеличилась на 0,44 м, при этом средняя скорость вертикальной деградации вечномёрзлых грунтов составляет 3,42 см в год. Средние темпы оттаивания вечной мерзлоты, по данным многолетних измерений [59], составляют около 3 см в год, но непосредственно под автомобильными дорогами темпы оттаивания возрастают до

11-13 см в год. Это уже вызывает насущную необходимость уточнения методов районирования территорий с наличием вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов [17].

Транспортная система является одним из важнейших элементов, обуславливающих темпы социально-экономического развития северных регионов России. В условиях значительной удаленности этих регионов от основных социально-экономических центров страны именно транспортная система обеспечивает связность территорий России и создает единое пространство для перемещения людей и грузов [20, 27]. Систематическое освоение сосредоточенных в арктической зоне месторождений полезных ископаемых, добыча которых формирует значительную часть российской экономики, закономерно сопряжено с развитием транспортной инфраструктуры; надежность и бесперебойность ее функционирования является обязательным условием устойчивого развития арктических территорий [3, 18, 22].

Количественной оценкой меры снижения эксплуатационной пригодности объекта (происходящей в результате некоторых изменений, неблагоприятных для функционирования объекта) в общем случае является величина риска [39, 40]. Для сложных объектов риск определяется с учетом вероятности нарушения работоспособности отдельных элементов (индивидуальный риск) и совместного влияния всех элементов на функционирование объекта в целом (системный риск) [58]. Технология оценки рисков с помощью экспертного анализа состояния объекта, основанная на классификации выявленных дефектов, показана в [41, 72]. Количественной оценке риска от различных природных явлений посвящены работы [25, 26]. Многочисленными исследованиями подтверждается целесообразность использования поверхности отклика для существенного снижения вычислительной нагрузки [52, 57, 61].

Одним из основных факторов, повышающих уязвимость транспортных систем северных регионов России, являются агрессивные эксплуатационные условия [10], к которым относится и наличие вечной мерзлоты в основании автодорожного профиля [4]. Природно-

климатические параметры окружающей среды (в частности, температура воздуха) оказывают очевидное влияние на транспортные процессы [44]. Определение прогнозной осадки для оттаивающего вечномерзлого грунта (в соответствии с климатическими и грунтовыми особенностями территории, а также принятым сценарием климатических изменений) является ключевым моментом процедуры прогнозирования эксплуатационной пригодности автодорожной сети. Последствия потепления климата для эксплуатационного состояния автотранспортной сети криолитозоны показаны в [88], где дополнительное оттаивание вечномерзлого грунта в основании дороги ожидается на уровне 15-20 см (при потеплении климата на 2 градуса). В [70] в течение ближайших 50 лет прогнозируется вертикальное смещение (осадка) основания дороги в результате оттаивания грунта на величину более 14 см, которая будет на 5-7% больше при наличии систематических динамических нагрузок от движущегося автотранспорта. Горизонтальное смещение автодорожного профиля ожидается на уровне 9-10 см.

По мере нарастания глобальных климатических изменений, перспектива массового снижения функциональности инфраструктурных объектов в криолитозоне становится все более реальной [79]. Прогнозирование негативного влияния климатических изменений на транспортные системы должно осуществляться в рамках общей цифровой парадигмы их развития [11], на основе вероятностных моделей [23, 38], учитывающих, в том числе неопределенности в предстоящих изменениях климатических параметров. Оценка рисков должна осуществляться с учетом природно-климатических особенностей отдельных территорий [36]. В дальнейшем климатические риски должны быть интегрированы в единую систему управления рисками [77] в целях повышения надежности функционирования транспортных систем северных регионов России.

Влияние климатических изменений на эксплуатационное состояние зданий и сооружений, их надежность и долговечность имеет мно-

гоаспектный характер [29, 43] и рассмотрено в значительном количестве работ. Чувствительность прогнозных характеристик зданий к значениям климатических параметров исследована в [82]. В [46] показано, что эффект изменения климата приводит к сокращению срока службы железобетонных конструкций на величину от 1.4 до 2.3%, с возрастанием до 7% для конструкций, подверженных циклическому нагружению. Исследование долговечности ограждающих материалов и элементов зданий с учетом ожидаемых изменений климата выполнено в [65]. Прогнозируемая морозостойкость каменных фасадов Монреаля к 2050 году снизится, а к 2080 году повысится относительно текущего состояния климата [78]. Существенное изменение морозостойкости бетонных фасадов на юге Финляндии прогнозируется уже к 2030 году [75].

Методологические подходы к прогнозированию состояния климата весьма разнообразны [66, 92], при этом вероятностный характер климатических изменений обуславливает неопределенности в величинах будущих нагрузок, воздействующих на здания и сооружения и определяющих их надежность и долговечность. В отношении прогнозирования отдельных климатических параметров можно выделить [51], где комбинированное использование глобальных и региональных моделей циркуляции атмосферы позволяет получать высокоточные данные о будущих осадках на территории. Прогнозирование интенсивности солнечной радиации методом случайного подпространства [50] позволяет получать коэффициент корреляции 0,98 между ожидаемыми и впоследствии наблюдаемыми значениями данного параметра. Многоаспектные климатические модели, использованные для регионов Центральной и Восточной Европы, показали ожидаемое потепление на величину до +3 °C к 2050 году и до +5 °C к 2100 году [47]. С учетом естественной вариативности по отдельным годам, изменение климата может проявляться в отношении либо его отдельного параметра (как изменение среднего значения, дисперсии, частоты появления или плотности вероятности), либо нескольких параметров одновременно (многовариантный анализ) [68].

Получение прогнозных сценариев на основе климатических моделей объективно сопряжено с плохо преодолимыми трудностями: модели сложных систем, к которым относится и климат, обладают явно выраженными стохастическими свойствами и тенденциями к потере устойчивости при длительных прогнозных периодах [73]. Достаточно точным методом получения территориально-привязанных климатических прогнозов является погодный генератор [62]. Разброс прогнозных значений для интенсивности дождя с сильным ветром в пределах 30-летнего интервала может составлять до 13% [74]. Погрешность прогнозирования температуры воздуха с помощью нейронной сети, осуществляемого на основе данных за предшествующий 65-летний период, оценивается на уровне 0.9 градусов по Цельсию [96]. В отдельных случаях большие неопределенности в величинах будущих воздействий на инженерные сооружения могут приводить к неоднозначным результатам при оценке их безопасности [86].

В работе [55] систематизированы основные опасности, порождаемые глобальными изменениями климата. Среди них необходимо выделить ускорение медленных природных процессов, к которым относится и повышение темпов деградации вечномерзлых грунтов. В пределах криолитозоны главным фактором, обуславливающим снижение надежности и долговечности зданий и сооружений, является ускоренное оттаивание вечномерзлого грунта. Это приводит к снижению несущей способности оснований инженерных объектов [24] и, в частности, к возможности полного или частичного разрушения дорожной сети с соответствующим снижением ее пропускной способности [90]. Высокая чувствительность вечной мерзлоты прерывистого характера к долгосрочному потеплению показана в [48].

Влияние глобального потепления на эксплуатационное состояние инфраструктурных объектов криолитозоны рассмотрено в [45, 64, 83, 89]. Одним из наиболее опасных факторов является таяние вечномерзлых грунтов высокой влажности, для которых неприменим ряд методов расчета прочности и осадки, эффективно используемых для

грунтов с низкой влажностью [93]. Для количественной оценки риска объектам автотранспортной инфраструктуры в криолитозоне учет содержания льда в грунте является обязательным; в результате возможно прогнозирование климатических рисков с коэффициентом корреляции для прогнозных и впоследствии наблюдаемых уровней повреждения около 0,74 [95]. Исследованию различных аспектов функционирования автодорожного профиля, в том числе его разрушения под влиянием различных внешних воздействий посвящены работы [53, 54, 67, 69, 80, 81, 94].

Для повышения достоверности прогнозирования будущего состояния климата в [87, 91] предложены различные конфигурации информационной системы для сбора данных о текущих значениях климатических параметров. Система управления функциональным состоянием инфраструктурных объектов, включающая в себя постоянно актуализируемые базы данных об основных параметрах, влияющих на работоспособность этих объектов, рассмотрена в [15].

Оценку рисков в отношении протяженных объектов, к которым в первую очередь относится транспортная сеть, наиболее целесообразно выполнять на основе геоинформационных технологий [21, 34], позволяющих наиболее эффективно реализовывать алгоритмы обработки пространственно-координированных данных [32]. При этом подразумевается картографическая форма представления результатов количественной оценки рисков [42]; общие принципы такого подхода, в том числе применительно к транспортным системам показаны в [12, 19, 31, 35].

Снижение климатических рисков до допустимого уровня для вновь сооружаемых объектов достигается увеличением опорной части фундаментов на величину, определяемую решением вероятностно-экономической задачи [63]. Для существующих объектов уменьшение рисков возможно за счет инженерно-технических мероприятий, противодействующих влиянию климатических изменений и сохраняющих температурный режим вечномёрзлого грунта.

## 1.2. Смысловое содержание основных терминов

В процедуре оценки климатических рисков используются следующие базовые термины.

*Состояние климата (климат)* – совокупность параметров  $\{c_1 \dots c_N\}$ , характеризующих погодные условия на конкретной территории на протяжении одного полного года. Форма представления этих параметров должна позволять определять их значения в любой момент года. Соответственно, возможно либо формализованное описание параметра в виде непрерывной функции от времени  $c_i(t)$ ,  $t \in [0; 1 \text{ год}]$ , либо как множества пар значений  $(c_{i,1}; t_1) \dots (c_{i,K}; t_K)$ . Во втором случае значения параметров в промежуточные моменты времени, не указанные в явном виде при их описании, определяются по интерполяции между двумя ближайшими значениями.

*Функциональность объекта* – его способность выполнять полезную работу или служить основой для выполнения полезной работы в составе транспортной системы, элементом которой он является. Для количественной характеристики функциональности служит показатель  $u \in [0; 1]$ . Значение  $u = 1$  соответствует условиям эксплуатации и состоянию объекта, при которых он полностью выполняет свои задачи как часть транспортной системы, и вероятность его отказа (вследствие полного или частичного разрушения) не превышает величин, предусмотренных при его проектировании. Снижение функциональности ( $1 > u > 0$ ) обуславливается либо неудовлетворительным техническим состоянием объекта, при котором невозможно полноценное выполнение полезной работы, либо повышенной вероятностью его отказа, превышающей проектные значения. Возможно и совместное влияние двух выше обозначенных факторов на функциональность. При  $u = 0$  эксплуатация объекта становится невозможной. Показатель функциональности  $u$  не может быть получен как непосредственный результат наблюдения или измерения и является вычисляемой величиной. Несмотря на связь показателя функциональности с вероятностью отказа, его, как правило, нельзя отождествлять с вероятностью безотказной работы.



*Критериальный показатель функциональности объекта (критерий)* – измеряемая величина  $\delta$ , на основе которой производится вычисление показателя функциональности  $u$ . При этом для возможных значений  $\delta$  выделяются три области  $\{\Delta_1, \Delta_{0-1}, \Delta_0\}$ . Область  $\Delta_1$  соответствует полной функциональности объекта и, соответственно, при  $\delta \in \Delta_1$  значение показателя функциональности  $u = 1$ . Аналогично, невозможность эксплуатации объекта ( $u = 0$ ) определяется условием  $\delta \in \Delta_0$ . Область пониженной функциональности  $\Delta_{0-1}$  характеризуется определенной зависимостью  $u(\delta)$ , задаваемой дополнительно с учетом особенностей рассматриваемого объекта. Принципиальным ограничением на вид зависимости  $u(\delta)$  является требование о ее монотонности. Возможно использование нескольких критериальных показателей для одного объекта, когда каждому критерию  $\delta_i$  соответствует свой показатель функциональности  $u_i$ . Также возможно использование единого показателя функциональности, значение которого зависит от нескольких критериальных показателей как  $u(\delta_1, \dots, \delta_N)$ .

*Негативные последствия от снижения функциональности* возникают, когда  $u < 1$ . При полной функциональности объекта негативные последствия  $D$  принимаются равными нулю; в случае  $u = 0$  негативные последствия максимальны:  $D = D_{\max}$ . В общем случае показатель  $D$ , связанный в области  $1 > u > 0$  обратной зависимостью с  $u$ , отражает снижение эффективности (или, точнее, рост неэффективности) эксплуатации объекта по мере снижения его функциональности. Увеличение неэффективности проявляется как рост затрат при выполнении связанной с объектом полезной работы (понимая под затратами расход определенного вида ресурсов и включая в них затраты, необходимые на восстановление работоспособности объекта). Для количественной оценки негативных последствий наиболее целесообразно использовать стоимостные показатели, интерпретируемые как ущерб от неполной функциональности объекта. При невозможности количественного описания связи между величиной  $u$  и

размером ожидаемого стоимостного ущерба негативные последствия  $D$  выражаются как изменение показателей объекта в составе транспортной системы (повышение аварийности, снижение пропускной способности дорожного сегмента, увеличение среднего времени на его преодоление и так далее).

*Среднегодовая динамика состояния окружающей среды* описывается как множество параметров  $\mathbf{V}$ , которые в вычислительном процессе являются промежуточными между состоянием климата  $\{c_1 \dots c_N\}$  и критериальным показателем (показателями)  $\delta$ . Множество  $\mathbf{V}$  может иметь соответствующую предметной области внутреннюю многоуровневую структуру при соблюдении последовательности вычислений  $\{c_1 \dots c_N\} \rightarrow \mathbf{V} \rightarrow \{\delta_1 \dots \delta_K\}$ . Поскольку значения всех климатических показателей известны или могут быть вычислены для любого момента в течение среднестатистического года, функционально связанные с ними параметры динамики состояния окружающей среды  $\mathbf{V}$  также вычисляемы для произвольного момента времени.

*Риск климатических изменений  $R$*  – величина негативных последствий, ожидаемых в течение заранее определенного периода эксплуатации объекта и связанных со снижением его функциональности под влиянием возможных климатических изменений. Единицы измерения  $R$  и  $D$ , как правило, совпадают. Необходимость использования риска  $R$  в дополнение к показателю негативных последствий  $D$  обусловлена неопределенностями в состоянии климата и, соответственно, вероятностным характером параметров  $\{c_1 \dots c_N\}$ . Каждому фиксированному набору значений  $\{c_1 \dots c_N\}$  соответствует определенное значение  $D$ . При учете же климатических неопределенностей не существует единственно возможного значения  $D$ , и этот показатель превращается в случайную величину  $\tilde{D}$ , закон и параметры распределения которой определяются, в том числе, закономерностями в вариативности климатических параметров. Риск  $R$  является скалярной оценкой  $\tilde{D}$ , наиболее удобной в некотором заранее зафиксированном смысле (наиболее вероятное значение  $\tilde{D}$ , средневзвешенное значение, величина с заданной обеспеченностью и так далее).

При использовании нескольких показателей функциональности  $u_i$ , по каждому из которых применяется своя оценка величины негативных последствий  $D_i$ , формируется соответствующее количество показателей  $R_i$  (в совокупности образующие многокритериальную оценку риска).

В процедурах оценки климатических рисков для объектов транспортной инфраструктуры использованы следующие базовые положения (концептуальные основы).

Основным фактором, наиболее значимо влияющим на снижение функциональности объектов транспортной инфраструктуры криолизотозоны в условиях климатических изменений, является деградация вечномёрзлых грунтов в основании этих объектов, что проявляется в снижении их несущей способности и повышении деформативности по мере увеличения мощности сезонно-талого слоя.

Критериальными показателями функциональности объектов являются величина несущей способности основания и величина осадки основания. Определение значений критериальных показателей осуществляется на основе действующих норм расчета оснований и фундаментов, с учетом видов транспорта и особенностей конструктивных схем.

Динамика состояния окружающей среды для оснований и фундаментов в первую очередь определяется температурным режимом окружающего их грунта на протяжении, как минимум, одного полного среднестатистического года. На основании данных о температуре грунтов определяются их физико-механические характеристики (прочность и деформативность) как основа для вычисления критериальных показателей.

Температурный режим грунта определяется как результат моделирования теплопереноса в системе «грунт-атмосфера». Климатическими параметрами, учитываемыми в процессе моделирования, являются температура воздуха и скорость ветра в приземном слое, определяемые с учетом их изменчивости в течение года.

При определении критериальных показателей учитываются их наихудшие, с точки зрения функциональности объекта, значения на протяжении среднестатистического года (наименьшая несущая способность грунта под площадью опирания объекта и его наибольшая осадка).

Оценка функциональности в прогнозных климатических условиях определяется на основе критериальных показателей, вычисляемых для двух состояний климата – базового, без учета климатических изменений, и прогнозного. Значение критериального показателя для базового климата соответствует значению  $u = 1$  как начальной точки области пониженной функциональности  $1 > u > 0$ . Конечная точка этой области,  $u = 0$ , определяется экзогенным показателем  $\Delta$  (величина запаса). Функциональность в прогнозных климатических условиях определяется на основе расположения прогнозного критериального показателя в области пониженной функциональности; при выходе за ее пределы (исчерпанию запаса  $\Delta$ ) функциональность принимается равной нулю.

Климатический риск по умолчанию определяется как средневзвешенное значение негативных последствий  $\tilde{D}$  на всем возможном (рассматриваемом) диапазоне климатических изменений. Допускается иная интерпретация риска (например, как значение  $\tilde{D}$  с заданной вероятностью его непревышения), что должно обязательно фиксироваться во избежание искажения смыслового содержания данного показателя.

Влияние иных факторов, кроме деградации вечномерзлого грунта, может быть учтено при наличии достоверных зависимостей, отражающих количественную связь между значениями климатических параметров и уровнем функциональности объекта. Обязательным при этом является четкое фиксирование как критериальных показателей, так и зависимостей для их определения на основе заданного состояния климата.

### **1.3. Уровни расчета при количественной оценке рисков и структурные элементы методики расчета**

Методика предусматривает следующие уровни расчета при оценке климатических рисков.

**Уровень 1 (территориально-ориентированный).** Используется для первичного выявления территорий, на которых природно-климатические условия могут оказаться наиболее неблагоприятными с точки зрения возможной деградации криолитозоны и связанным с этим снижением функциональности объектов транспортной инфраструктуры. При оценке рисков на этом уровне состояние климата определяется по результатам многолетних инструментальных наблюдений; данные о физико-механических характеристиках грунтов принимаются усредненными, соответствующими наиболее типичным грунтовым условиям на территории; схемы фундаментов, в первую очередь глубина заложения и геометрические размеры площади опирания на грунт также соответствуют наиболее часто применяемым на территории конструктивным типам.

Оценка риска, получаемая на этом уровне, является относительной и отражает основные тенденции в изменении функциональности однотипных объектов в различных климатических условиях или, наоборот, сравнительный риск для различных объектов, эксплуатируемых на одной территории. Для достоверного выявления зависимости функциональности объектов от определенных факторов (климатических, грунтовых, конструктивных) необходимо фиксировать все параметры расчетной модели, кроме тех, влияние которых исследуется, и выполнять неоднократные расчеты при различных значениях влияющего параметра.

Характерной особенностью территориально-ориентированного уровня оценки климатических рисков является относительно небольшой объем эмпирических данных, необходимых для расчета. Это позволяет с минимальными затратами количественно оценивать риски в весьма больших диапазонах варьируемых параметров, и вы-

являть участки территории или даже отдельные объекты, находящиеся в наиболее уязвимых условиях, для которых целесообразно дальнейшее уточнение величины рисков на 2-м уровне методики.

**Уровень 2 (объектно-ориентированный)** используется для получения оценок климатического риска в отношении конкретного объекта, с учетом его индивидуальных конструктивных особенностей. В зависимости от детализации данных об объекте в методике выделяются следующие подуровни.

- *Подуровень 2.1* учитывает реальные геометрические размеры площади опирания объекта на грунт и определенные по результатам инженерных изысканий характеристики грунта при базовом состоянии климата. Величина нагрузки, передаваемой объектом на грунт, вычисляется исходя из несущей способности грунта при базовом состоянии климата и величины запаса, задаваемой экзогенно. Эта определенная косвенным образом нагрузка считается постоянной при любых рассматриваемых климатических изменениях и обусловленных ими изменениях физико-механических характеристик грунта. Также на основе этой нагрузки определяется осадка объекта в различных климатических условиях.

- *Подуровень 2.2*, в дополнение к данным предыдущего подуровня, использует фактический запас функциональности объекта, для определения которого необходима информация о реально действующих на грунт нагрузках от объекта; сопоставляя эту нагрузку с несущей способностью грунта в базовых климатических условиях, определяют фактическую величину запаса.

- *Подуровень 2.3* предполагает использование альтернативных моделей и алгоритмов расчета критериальных показателей по сравнению с рассматриваемыми в настоящей методике. Эти модели и алгоритмы могут основываться на ведомственных нормах расчета объектов, учитывающих специфику вида транспорта, на альтернативных моделях теплопереноса в грунтовом массиве и зависимостях между температурой грунта и его физико-механическими характери-

стиками, являющихся, в том числе, результатами научных исследований. К данному подуровню относится и использование при оценке климатических рисков иных критериальных показателей, вместо несущей способности грунта и величины его осадки, либо в дополнение к ним.

Выбор подуровня определяется с учетом важности объекта и величины возможных негативных последствий от снижения его функциональности, что обуславливает требуемую точность при количественной оценке климатических рисков. По мере перехода к более высокому подуровню увеличивается точность получаемых оценок, но одновременно растут затраты необходимых для ее вычисления ресурсов (главным образом, за счет дополнительных данных о фактическом состоянии объекта, что связано с его натурным обследованием).

Методика оценки климатических рисков должна содержать следующие основные структурные элементы.

1. *Вводная часть.* Общая характеристика целей и задач, решаемых с использованием методики, описание области применения и границ применимости. Деграция вечномёрзлых грунтов как основной фактор, влияющий на снижение функциональности объектов транспортной инфраструктуры под влиянием климатических изменений.

2. *Основные термины,* используемые в методике, их смысловое содержание, обозначения наиболее важных параметров.

3. *Уровни и подуровни процедуры расчета климатических рисков;* перечень задач, решение которых наиболее целесообразно на соответствующем уровне (подуровне); сравнительная характеристика ожидаемых затрат ресурсов и точности получаемых результатов на каждом уровне (подуровне).

4. *Описание состояния климата.* Перечень используемых показателей; понятия базового и измененного климата. Описание процедуры получения показателей базового климата на основе данных

многолетних инструментальных наблюдений; понятие среднестатистического года и его формализованное описание. Возможные сценарии климатических изменений (равномерное потепление, изменение температурной контрастности и так далее) и соответствующие им изменения в значениях параметров базового климата. Вероятностный характер ожидаемых климатических изменений и его формализованное описание: определение температуры воздуха как случайной величины; определение параметров нормального закона ее распределения; вычисление вероятностей проявления температуры в определенных диапазонах значений.

5. *Процедура моделирования температурного режима грунтов.* Экзогенные параметры состояния грунта, рекомендации по их экспериментальному определению или назначению в соответствии с типичными условиями на территории. Расчетные физико-механические и теплофизические параметры, их связь с экзогенными параметрами и зависимость от температуры. Типовые формы грунтового массива, его разбиение на отдельные расчетные элементы. Зависимости для определения теплообмена по границам расчетных элементов «воздух–грунт» и «грунт–грунт». Критерии для определения текущего состояния грунта (мерзлое, охлажденное, талое). Организация вычислительного процесса: продолжительность периода моделирования, величина кванта времени между последовательно получаемыми значениями, промежуточные и окончательные результаты моделирования.

6. *Критериальные показатели.* Определение расчетного сопротивления и деформационных характеристик грунта в зависимости от его температуры, состояния и экзогенных параметров. Зависимости для определения несущей способности грунта и величины его осадки для фиксированной области грунтового массива. Рекомендации по назначению геометрических размеров области грунтового массива, используемой при определении критериальных показателей, для



различных видов объектов транспортной инфраструктуры. Последовательность выявления наихудших значений критериальных показателей на протяжении периода эксплуатации объекта.

*7. Оценка негативных последствий от снижения функциональности.* Показатель функциональности объекта, его взаимосвязь с соответствующим критериальным показателем. Показатель запаса как характеристика размера области пониженной функциональности объекта, способы определения (назначения) показателя запаса. Возможные зависимости для описания области пониженной функциональности, рекомендации по выбору зависимости определенного вида. Возможные формы количественной характеристики негативных последствий, их взаимосвязь с показателем функциональности.

*8. Количественная оценка климатических рисков.* Определение риска как скалярного значения для характеристики случайной величины негативных последствий (как статистики  $\tilde{D}$ ); возможные виды этой статистики (виды риска), их смысловая интерпретация и рекомендуемые области использования каждого вида. Зависимости для определения отдельных видов риска. Соотнесение количественных показателей риска с качественными уровнями опасности снижения функциональности (низкая – средняя – высокая). Многокритериальная оценка риска, способы получения единой оценки риска при одновременном учете нескольких критериальных показателей.

*9. Мероприятия по снижению климатических рисков.* Инженерно-технические мероприятия и конструкции, рекомендуемые для сохранения функциональности объектов криолитозоны в условиях изменяющегося климата. Сезонные охлаждающие устройства (СОУ): принцип действия и конструктивные параметры, влияющие на интенсивность замораживания грунта. Учет наличия СОУ при моделировании теплового режима грунта, зависимости для определения теплообмена по границам расчетных элементов «СОУ – грунт». Целесообразность использования СОУ в различных природно-климатических условиях криолитозоны. Основные принципы оценки экономической

эффективности инженерно-технических мероприятий по снижению климатических рисков.

10. *Рекомендации по совершенствованию расчетной модели и используемых в ней зависимостей.* Пути возможного повышения точности при оценке климатических рисков, достигаемой за счет усложнения расчетной модели или расширения границ ее применимости на другие виды грунта. Альтернативные критериальные показатели. Структура вычислительного процесса, рекомендуемая при использовании альтернативных моделей.

#### **1.4. Содержание процедуры оценки климатических рисков и ее основные этапы**

Основным содержанием процедуры оценки климатических рисков является определение критериальных показателей, характеризующих функциональность объекта в различных (прогнозных) климатических условиях, выявление ожидаемых негативных последствий (ущерба) как следствия снижения функциональности объекта, и получение количественных оценок риска с учетом как вероятностей наступления негативных последствий, так и их величины.

Общий перечень критериальных показателей, по значениям которых можно судить о функциональности объекта, достаточно широк. В принципе, любой параметр, используемый для характеристики объекта, может быть принят в качестве критериального показателя. В то же время должна существовать и быть известной зависимость между одним или несколькими климатическими параметрами, и величиной принятого критериального показателя, причем эта зависимость должна быть выражена в количественной форме, пригодной для численного моделирования. Данное требование, по состоянию наших знаний на настоящий момент времени, сильно сужает перечень критериальных показателей, по которым возможно получение количественных оценок климатических рисков. Для объектов транспортной инфраструктуры в криолитозоне наиболее пригодными критериаль-

ными показателями могут считаться те, которые функционально связаны с физико-механическими характеристиками вечномёрзлого грунта в основании рассматриваемого объекта – в первую очередь это несущая способность грунта и его осадка.

При оценке функциональности объекта целесообразно использовать показатель  $U$ , значения которого могут изменяться в интервале от 0 (что интерпретируется как полная невозможность эксплуатации объекта) до 1 (максимально возможный уровень функциональности). Для каждого критериального показателя  $\delta_i$  необходимо зафиксировать зависимость  $U_i(\delta_i)$ ; общий вид таких зависимостей показан на рис. 1.1.

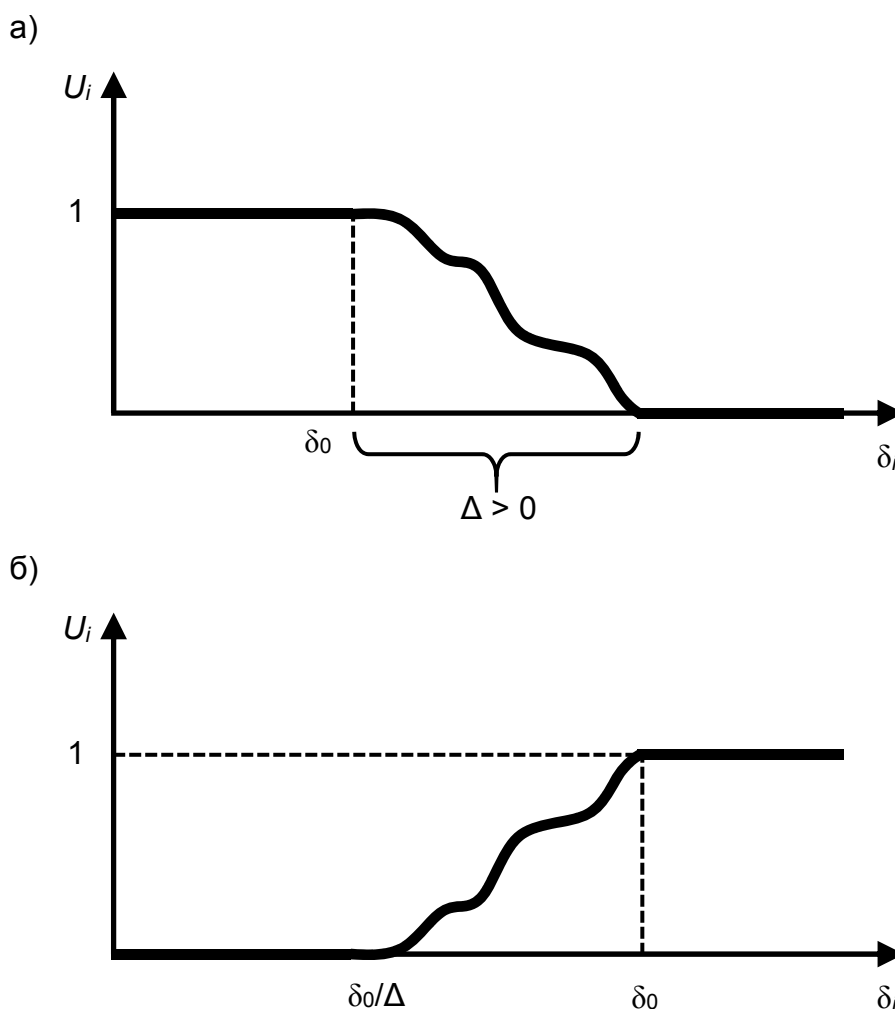


Рис. 1.1. Общий вид зависимостей уровня функциональности  $U_i$  от  $i$ -го критериального показателя  $\delta_i$ ;  $\delta_0$  – критериальный показатель при базовом состоянии климата;  $\Delta$  – величина, характеризующая запас функциональности; а) – обратная зависимость (осадка), б) – прямая зависимость (несущая способность)

Графики, отражающие зависимости  $U_i(\delta_i)$ , состоят из трех участков, два из которых соответствуют экстремально возможным уровням функциональности  $U_i = 0$  и  $U_i = 1$ , а третий соответствует переходной области. Протяженность этой области по оси значений  $\delta_i$  определяется величиной запаса  $\Delta$ , которая может быть задана как в абсолютных единицах ( $\Delta > 0$  на рис. 1.1,а), так и относительно значения критериального показателя на границе участка  $U_i = 1$  ( $\Delta > 1$  на рис. 1.1, б); во втором случае  $\Delta$  фактически является коэффициентом запаса. Переходная область может быть задана любой монотонной функцией, точный вид которой назначается в зависимости от особенностей функционирования рассматриваемого объекта.

Необходимо отметить, что формально уровень функциональности  $U$  является показателем работоспособности  $S$  (1.5 [37]), нормированным в диапазоне  $[0; 1]$ . Если при количественной оценке риска используется непосредственно уровень функциональности, получаемое значение риска (по соответствующему критерию) является безразмерной величиной и будет представлять собой средневзвешенное значение  $\bar{U}_i$  на всем возможном диапазоне климатических изменений. Важным обстоятельством при этом является то, что несмотря на принадлежность значений  $\bar{U}_i$  диапазону  $[0; 1]$ , эту оценку риска не вполне корректно рассматривать как вероятность разрушения объекта (полной утраты его функциональности). Для более точного понимания сущности значений, характеризующих риск, целесообразно осуществлять промежуточный перевод уровней функциональности  $U(\delta)$  в единицы измерения ущерба (вреда, негативных последствий)  $D(U)$ , в соответствии с 1.8 [37]. Таким образом, и риск будет представлять собой наиболее вероятную величину  $\bar{D}$ , что существенно упрощает его интерпретацию. Выбор вида и параметров конкретной зависимости  $D(U)$  осуществляется с учетом особенностей функционирования рассматриваемого объекта, но представляется, что эта зависимость должна быть, как минимум, невозрастающей.

Очевидно, что значимое влияние на функциональность объекта в криолитозоне, а значит, и на величину риска, будет оказывать состояние грунта в некоторой ограниченной области, расположенной в непосредственной близости к площади передачи нагрузки от основания объекта. Так, не имеет смысла рассматривать грунт выше подошвы фундамента, поскольку его физико-механические характеристики не влияют ни на осадку объекта, ни на его несущую способность. Также с увеличением расстояния от площади передачи усилий на грунт достаточно быстро падают значения коэффициента рассеяния напряжений в грунте, что, в свою очередь, ограничивает его реально необходимый для рассмотрения и моделирования объем. Параметры, используемые для фиксирования области грунтового массива, учитываемой при моделировании климатических рисков, показаны на рис. 1.2.

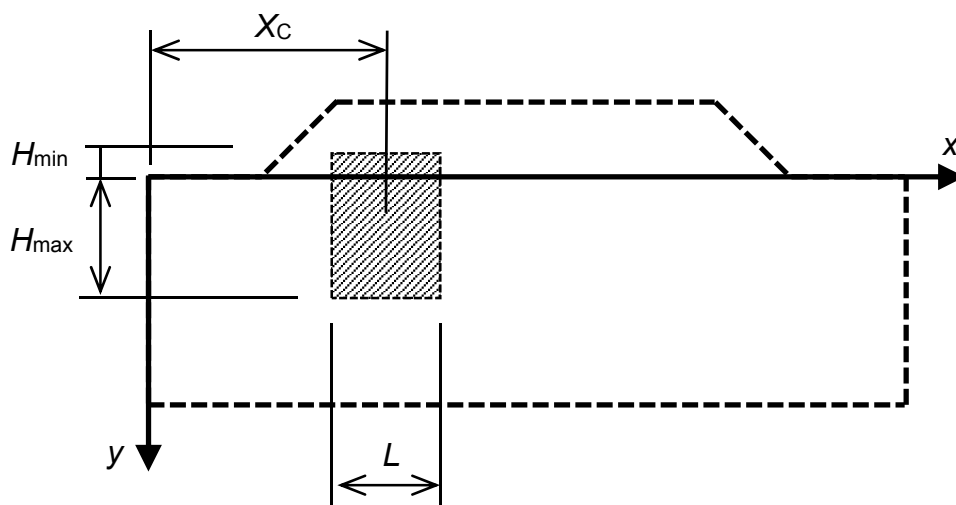


Рис. 1.2. Область грунтового массива, учитываемая при моделировании климатических рисков для объектов криолитозоны

При определении климатических рисков принимаются во внимание наименьшие уровни функциональности (и соответствующие им максимальные значения ущерба), ожидаемые в течение рассматриваемого среднестатистического года. Поскольку климатические изменения (формально описываемые как смещения некоторых климатических параметров по сравнению с их базовыми значениями)

имеют явно выраженный вероятностный характер, необходимо рассматривать определенный спектр возможных изменений климата и соответствующих им среднестатистических лет, с вычислением для каждого из них величины риска и последующим получением единой обобщенной оценки риска. Такая обобщенная оценка обязательно должна учитывать вероятности появления тех или иных значений климатических параметров.

Основным климатическим фактором, определяющим динамику физико-механических свойств вечномёрзлых грунтов в течение года, является температурный режим воздуха на территории, для которого климатические изменения формально описываются как смещение температурных показателей на величину  $\Delta T$ . При этом целесообразно рассматривать  $\Delta T$  как случайную величину, характеризуемую некоторым законом ее распределения (принимаемым априорно либо по результатам многолетних наблюдений), фиксированным средним значением  $\Delta T_{\text{med}}$  и вероятностью  $p_\varepsilon$ , с которой допускается (в рамках принятой модели) отклонение температуры от  $\Delta T_{\text{med}}$  на величину, превосходящую  $\varepsilon_T$  (рис. 1.3).

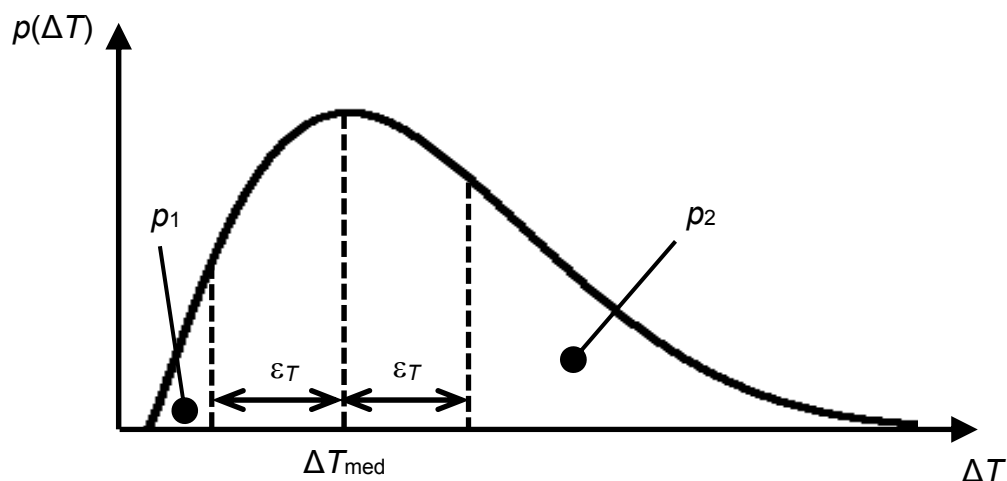


Рис. 1.3. Плотность вероятности для случайной величины  $\Delta \tilde{T}$

Параметры закона распределения случайной величины  $\Delta \tilde{T}$  определяются из условия (1.1), после чего становится возможным

вычислять вероятности для ее отдельных реализаций, а значит, и вероятности появления соответствующих этим реализациям уровней функциональности  $U$  и значений ущерба  $D$ :

$$\int_{\Delta T_{\text{med}} - \varepsilon_T}^{\Delta T_{\text{med}} + \varepsilon_T} p(\Delta T) dt = 1 - p_\varepsilon. \quad (1.1)$$

Последовательность количественной оценки климатических рисков может быть укрупненно разделена на следующие этапы.

**Этап 1.** Фиксирование параметров, соответствующих базовому (неизмененному) состоянию климата на территории, которые, как правило, определяются на основе многолетних данных инструментальных наблюдений за климатом. Выбор сценария ожидаемых климатических изменений (основные сценарии рассмотрены в п. 3.3) и вычисление климатических параметров, соответствующих выбранному сценарию.

**Этап 2.** Фиксирование основных физико-механических параметров грунта в основании рассматриваемого объекта (его типа, суммарной влажности, засоленности и так далее – см. п. 4.1). Значения этих параметров могут быть определены по имеющимся проектным данным, по результатам натурного обследования или приняты равными некоторым типичным для рассматриваемой территории значениям. Определение формы грунтового массива, являющегося основанием рассматриваемого объекта (ровная поверхность, котлован, выступающий дорожный профиль).

**Этап 3.** Моделирование температурного режима грунта на протяжении, как минимум, одного полного среднестатистического года – по отдельности для базового состояния климата и с учетом климатических изменений. Поскольку ожидаемые изменения климатических параметров имеют вероятностный характер, температурный режим грунта определяется для некоторого количества возможных значений этих параметров (для достижения приемлемой точности рекомендуется учитывать не менее трех вариантов).

**Этап 4.** Выбор критериальных показателей  $\delta_1 - \delta_n$ , используемых при оценке климатических рисков. Для каждого рассматриваемого состояния климата, с помощью анализа соответствующей ему температурной динамики грунта, выявляются наихудшие, с точки зрения функциональности объекта, значения этих показателей на протяжении среднестатистического года.

**Этап 5.** Формализованное описание зависимостей  $U_i(\delta_i)$  между значениями критериальных показателей и уровнем функциональности объекта (рис. 1.1) – отдельно по каждому критериальному показателю. Назначение величины запаса  $\Delta_i$  для каждого показателя – по результатам анализа норм проектирования либо на основе натурных обследований объекта. Также на этом этапе желательно зафиксировать зависимости  $D_i(U_i)$  для количественной оценки негативных последствий (ущерба) от снижения функциональности объекта.

**Этап 6.** Определение уровней функциональности и, желательно, соответствующих им негативных последствий при наихудших значениях критериальных показателей для каждого рассмотренного сочетания климатических параметров – базового и с учетом ожидаемых климатических изменений. Определение, исходя из предполагаемой вариативности климатических параметров в отдельные годы, вероятности проявления всех рассмотренных вариантов климатических изменений. Вычисление, исходя из полученных вероятностей, средневзвешенных значений негативных последствий по каждому критериальному показателю, которые интерпретируются как количественные оценки климатических рисков в отношении рассмотренного объекта транспортной инфраструктуры.

Для получения конкретных численных значений риска необходима программная реализация всех расчетных алгоритмов, в первую очередь для моделирования температурного режима грунта в зависимости от параметров состояния климата и для определения значений критериальных показателей на основе данных о динамике температурного режима грунта на протяжении среднестатистического года.



### 1.5. Особенности процедуры оценки рисков в зависимости от вида объектов транспортной инфраструктуры

Учет вида объекта транспортной инфраструктуры, а также вида транспорта, к которому относится данный объект, на уровнях (под-уровнях) 1, 2.1 и 2.2 осуществляется с помощью следующих параметров вычислительного процесса:

- форма грунтового массива и границы области, используемой для расчета критериальных показателей;
- виды критериальных показателей и зависимости, используемые для их количественного определения и отражающие физический смысл этих показателей;
- величина запаса, назначаемая экзогенно на уровне 1 и под-уровне 2.1.

Для наиболее распространенных в условиях криолитозоны объектов методикой предусматриваются две формы грунтового массива. Грунтовый массив с выступающей насыпью (рис. 1.4) применяется при оценке рисков отдельных участков *автодорожной и железнодорожной сети*; характерной особенностью такого массива является учет теплообмена не только по горизонтальным границам грунта и атмосферы, но и по линии откосов.

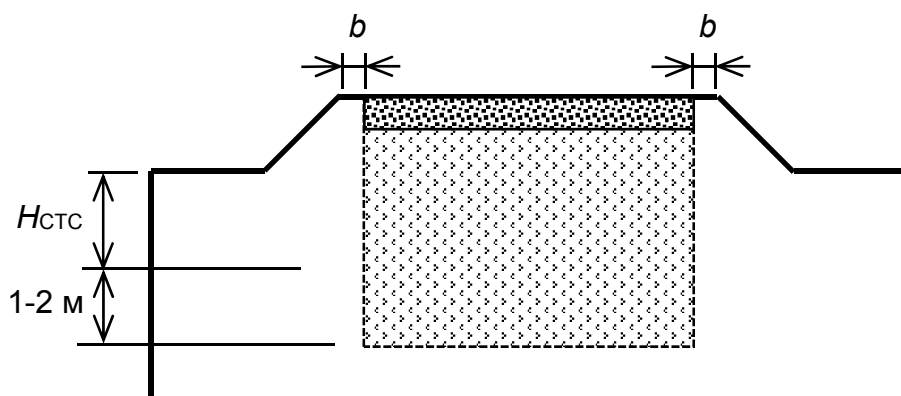


Рис. 1.4. Грунтовый массив в форме дорожного профиля:  $H_{СТС}$  – мощность сезонно-талого слоя при базовом климате,  $b = 0,5 - 1$  м (автодорожный профиль) или  $b = 0,2 - 0,5$  м (железнодорожный профиль)

Влияние наличия откосов на годовой температурный режим грунта увеличивается по мере возрастания высоты насыпи относительно ее ширины. Критериальным показателем функциональности объекта является осадка грунта  $\delta_1 = h_{\text{melt}}$ , определяемая по всей ширине покрытия дороги и до глубины, превышающей мощность сезонно-талого слоя, как минимум, на 1 м; соответствующая область в грунтовом массиве показана на рис. 1.4. Увеличение глубины грунта, включаемого в расчет критериального показателя, увеличивает потребность в вычислительных ресурсах, но не приводит к существенному повышению точности при определении значений  $\delta_1$ . Это объясняется тем, что осадка грунта ниже глубины его оттаивания (мерзлый грунт) практически отсутствует, а колебания мощности сезонно-талого слоя при изменении температуры воздуха от +1 до +2 °С заведомо менее 1 метра. При моделировании климатических изменений, связанных с потеплением воздуха более чем на +2 °С, возможно увеличение глубины грунта, рассматриваемого при определении критериального показателя  $\delta_1$ . Расчет осадки оттаивающего грунта  $h_{\text{melt}}$  производится по формуле:

$$h_{\text{melt}} = \Delta_x \sum_{T_i \geq T_{\text{bf}}} e_i, \quad (1.2)$$

где  $\Delta_x$  – пространственное разрешение модели (высота расчетного элемента грунтового массива), м;  $T_i$  и  $e_i$  – температура и относительная осадка при оттаивании для  $i$ -го слоя грунта (каждый слой мощностью  $\Delta_x$ );  $T_{\text{bf}}$  – температура замерзания грунта, °С.

У второй формы грунтового массива верхняя граница принимается горизонтальной (рис. 1.5); с его использованием оцениваются климатические риски для трех видов объектов транспортной инфраструктуры. *Аэродромное покрытие* является объектом, равномерно распределенным по плоскости грунта; его критериальный показатель  $\delta_1$  – осадка оттаивающего грунта  $h_{\text{melt}}$ , которая определяется по формуле (1.2), а область учитываемого грунта сосредоточена под всей

поверхностью покрытия на глубину, превышающую мощность сезонно-талого слоя не менее чем на 2 метра (рис. 1.5, позиция 1).

*Свайное основание* является элементом автомобильных и железнодорожных мостов, а также зданий вокзалов и прочих сооружений всех видов транспорта. При расчете критериального показателя рассматривается слой грунта, непосредственно примыкающий к подземной части сваи, как показано на рис. 1.5, позиция 2.

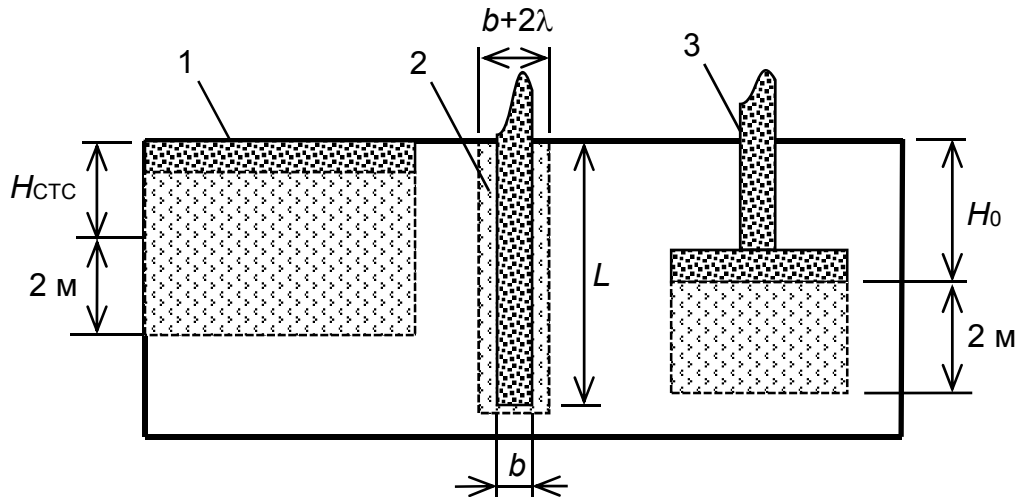


Рис. 1.5. Грунтовой массив с горизонтальной поверхностью: 1 – аэродромное покрытие, 2 – свайное основание, 3 – ленточный или столбчатый фундамент;  $H_{СТС}$  – мощность сезонно-талого слоя при базовом климате,  $b$  – ширина сваи,  $\lambda \rightarrow 0$ ,  $L$  – глубина погружения сваи,  $H_0$  – глубина заложения фундамента

Критериальным показателем функциональности  $\delta_2$  для отдельной сваи является полная несущая способность  $N$ , определяемая с учетом опирания сваи на вечномерзлый грунт (нормальные напряжения) и прочности грунта по ее вертикальным граням (касательные напряжения):

$$N = 4b\Delta_x \sum R_{sh,i} + b^2 R_b, \quad (1.3)$$

где  $R_{sh,i}$  – расчетное сопротивление по грунту для  $i$ -го слоя грунта по вертикали, МПа;  $R_b$  – расчетное давление на грунт под нижним концом сваи, МПа.

*Ленточные и столбчатые фундаменты* также используются в зданиях и сооружениях любых видов транспорта. В качестве критериального показателя  $\delta_3$  применяется минимальная несущая способность грунта, рассчитываемая по каждому слою в пределах нижележащей области грунта, рекомендуемая высота которой должна составлять 2 метра (рис. 1.5, позиция 3). Увеличение высоты рассматриваемой области не обеспечит возрастания точности (обнаружения слоев с наименьшей несущей способностью), поскольку влияние коэффициентов рассеивания напряжений в грунте станет определяющим по сравнению с его прочностью. Предполагая, что в направлении, перпендикулярном плоскости рис. 1.5, температурный режим грунта, а значит, и его несущая способность не изменяются, можно получить приведенное к единице площади значение минимальной несущей способности  $R_{\min}$ , являющееся критериальным показателем  $\delta_3$  для этого вида объектов:

$$R_{\min} = \min_i \left( \sum_j \frac{R_{i,j}}{\alpha_{i,j}} \right), \quad (1.4)$$

где  $i$  – номер вертикального слоя грунта высотой  $\Delta_x$  от поверхности опирания фундамента;  $j$  – порядковый номер расчетного элемента шириной  $\Delta_x$  в пределах ширины поверхности опирания;  $R_{i,j}$  – расчетное давление под подошвой столбчатого (ленточного) фундамента, МПа;  $\alpha_{i,j}$  – коэффициент рассеивания напряжений в грунте для текущего расчетного элемента.

В целом на уровнях (подуровнях) 1, 2.1 и 2.2 методика предполагает унифицированные по видам объектов и видам транспорта методы и алгоритмы расчета климатических рисков. В таблице 1.1 приведены параметры расчета, рекомендуемые в зависимости от вида объектов транспортной инфраструктуры и вида транспорта, на котором они используются. При необходимости более полного учета отраслевой и/или объектной специфики методика предусматривает возможность организации расчетов на базе ведомственных (отраслевых) норм проектирования и эксплуатации, по дополнительно создаваемым и программно реализуемым алгоритмам.

Таблица 1.1

Параметры вычислительного процесса, назначаемые в зависимости от вида объекта транспортной инфраструктуры

№ п/п	Вид транспорта	Объект	Критериальный показатель и зависимость для его определения	Величина запаса*	Грунтовой массив
1.1	Автомобильный	Дорожный сегмент	Осадка оттаивающего грунта $\delta_1$ (1.2)	10 см	Рис. 1.4
1.2		Мостовое сооружение	Несущая способность свайного основания $\delta_2$ (1.3)	1,3	Рис. 1.5, поз. 2
1.3		Прочие здания и сооружения	Несущая способность свайного основания $\delta_2$ (1.3)	1,25	Рис. 1.5, поз. 2
1.4			Несущая способность столбчатого или ленточного фундамента $\delta_3$ (1.4)	1,2	Рис. 1.5, поз. 3
2.1	Железнодорожный	Дорожный сегмент	Осадка оттаивающего грунта $\delta_1$ (1.2)	5 см	Рис. 1.4
2.2		Мостовое сооружение	Несущая способность свайного основания $\delta_2$ (1.3)	1,4	Рис. 1.5, поз. 2
2.3		Прочие здания и сооружения	Несущая способность свайного основания $\delta_2$ (1.3)	1,25	Рис. 1.5, поз. 2
2.4			Несущая способность столбчатого или ленточного фундамента $\delta_3$ (1.4)	1,2	Рис. 1.5, поз. 3
3.1	Авиационный	Аэродромное покрытие	Осадка оттаивающего грунта $\delta_1$ (1.2)	5 см	Рис. 1.5, поз. 1
3.2		Прочие здания и сооружения	Несущая способность свайного основания $\delta_2$ (1.3)	1,25	Рис. 1.5, поз. 2
3.3			Несущая способность столбчатого или ленточного фундамента $\delta_3$ (1.4)	1,2	Рис. 1.5, поз. 3
4.1	Водный	Прочие здания и сооружения	Несущая способность свайного основания $\delta_2$ (1.3)	1,25	Рис. 1.5, поз. 2
4.2			Несущая способность столбчатого или ленточного фундамента $\delta_3$ (1.4)	1,2	Рис. 1.5, поз. 3

\* на уровне 1 и подуровне 2.1, при отсутствии данных обследования объекта

## **Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ**

### **2.1. Характеристика состояния климата на основе данных, соответствующих среднестатистическому году**

Важным обстоятельством, которое необходимо учитывать при формализованном описании климата, является различие между понятиями «погода» и «климат». В соответствии с [6], климат можно рассматривать как ансамбль погод. Погода изначально подвержена сильной вариативности, что затрудняет ее прогнозирование даже на относительно небольшие периоды (7-10 дней), и делает, как правило, невозможным, получение сколько-нибудь достоверных прогнозов за пределами 15-20 дней. В основе этого явления лежит так называемый «эффект бабочки», когда какое-либо незначительное локальное явление, не поддающееся, в силу своей малости, точному учету, может принципиально изменить последующую погодную ситуацию в весьма отдаленном месте. Причинно-следственная связь такого рода исследуется методами теории хаоса, позволяющими, в отдельных случаях, количественно проследить влияние незначительных изменений в некоторых входных переменных на вызываемые ими крупные аномалии в сложных системах (то есть на значения выходных переменных в формализованных моделях таких систем).

В то же время теория хаоса не предполагает полного отсутствия порядка. Какая-то часть выходных переменных в модели сложной системы с течением времени может изменяться очень резко и практически непредсказуемо, но другая часть переменных при этом сохраняет определенное постоянство своих значений, что является залогом стабильности всей системы в целом. В [6] показано, что, например, на этапе зарождения циклона относительно малое изменение некоторых условий может существенно изменить его траекторию или интенсивность, но неспособно значимо повлиять на такие параметры окружающей среды, как средняя температура воздуха, среднее коли-

чество осадков и т.д. Именно такие параметры характеризуют климат, который может рассматриваться как совокупность фоновых условий для погоды. При этом долгосрочные колебания климатических параметров являются более доступными для моделирования и предсказания, нежели осуществление отдельных погодных явлений.

Основным методом прогнозирования климатических изменений и оценки их ожидаемых последствий является численное, в том числе имитационное моделирование состояния атмосферы. Как показано в [6], в ведущих метеорологических центрах мира накоплены результаты такого моделирования, выполненные по различным ансамблям моделей и ансамблям прогонов (повторяющихся экспериментов при одних и тех же воздействиях внешних факторов – солнечной радиации, концентрации парниковых газов и т.д.). Результаты ретроспективного моделирования, полученные по разным моделям и при неодинаковых начальных условиях, с одной стороны, существенно различаются между собой, но, с другой стороны, всегда воспроизводят основные особенности изменений температуры воздуха, наблюдаемые в период «современного потепления» (с 1976 года). Это еще раз подтверждает необходимость выделения в состоянии атмосферы, рассматриваемой в конкретный момент времени, двух составляющих – достаточно случайной и не поддающейся долгосрочному прогнозированию (погода), и относительно стабильной, характеризующейся медленно и инерционно изменяющимися со временем параметрами (климат). Таким образом, при выполнении моделирования климатических изменений первоочередной задачей является выработка методики формализованного описания климата, которая гарантирует отсутствие в этом описании случайной составляющей и, наоборот, обеспечивает максимально полное наличие стационарных количественных параметров состояния атмосферы.

Среди методологий, применяемых для разделения высоковариативной и инерционной составляющих в отношении температуры воздуха, можно отметить использование концепции динамических

норм и динамических аномалий [6]. В рамках данной методологии динамические нормы локальной температуры конкретного сезона рассчитываются как отклик на изменение глобальной температуры, для чего привлекается метод наименьших квадратов. На его основе определяются параметры линейной регрессии (регрессором является глобальная температура одноименного месяца, предварительно сглаженная 11-летним фильтром) и рассчитывается динамическая норма, которая оценивается по периоду от 21 до 41 года. Итоговое значение динамической нормы получается экстраполированием на один год, непосредственно следующий за периодом оценивания. Наиболее эффективным был признан базовый период, равный 31 году. Отклонения температуры воздуха от этих динамических норм представляют собой динамические аномалии, которые являются предсказываемыми величинами и, в рамках принятой гипотезы, являются свободными от условий сезонности и изменения климата. При необходимости поправка на изменение климата должна вводиться непосредственно в прогноз (в терминах тех же динамических норм).

Нивелирование влияния случайной составляющей с помощью климатических показателей, усредненных по достаточно большому периоду, можно увидеть в [30]. Были получены средние многолетние температуры воздуха по отдельным месяцам за период 1961–1990 гг. (30 лет), для чего использовался архив среднемесячных значений данных наблюдений CRU (Climate Research Unit), полученный интерполяцией в узлах регулярной сетки ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ ) в пределах суши. Эти значения описывали состояние климата, считавшееся базовым и положенное в основу действующих в настоящее время строительных климатических норм. Прогнозные значения температуры определялись численным моделированием общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), на основе модели института метеорологии имени Макса Планка (ECHAM5), с пространственным разрешением и количеством уровней в атмосфере T63L31. По результатам моделирования определялись усредненные прогнозные значения за 2040–2069 гг.



(30 лет), которые использовались для количественного описания прогнозируемого состояния климата. Кроме того, были вычислены средние по отдельным месяцам температуры воздуха за период 1986-2005 гг. (20 лет), соответствующие современному состоянию климата. Таким образом, продолжительность периода усреднения климатического показателя составляла от 20 лет (современный климат) до 30 лет (базовый и прогнозный климат).

Отдельного внимания заслуживает вопрос о продолжительности периода, за который наиболее целесообразно выполнять осреднение климатических показателей. В [9], применительно к температуре приземного воздуха на территории России, построены линейные тренды, приведенные за 25, 50 и 100 лет (рис. 2.1):

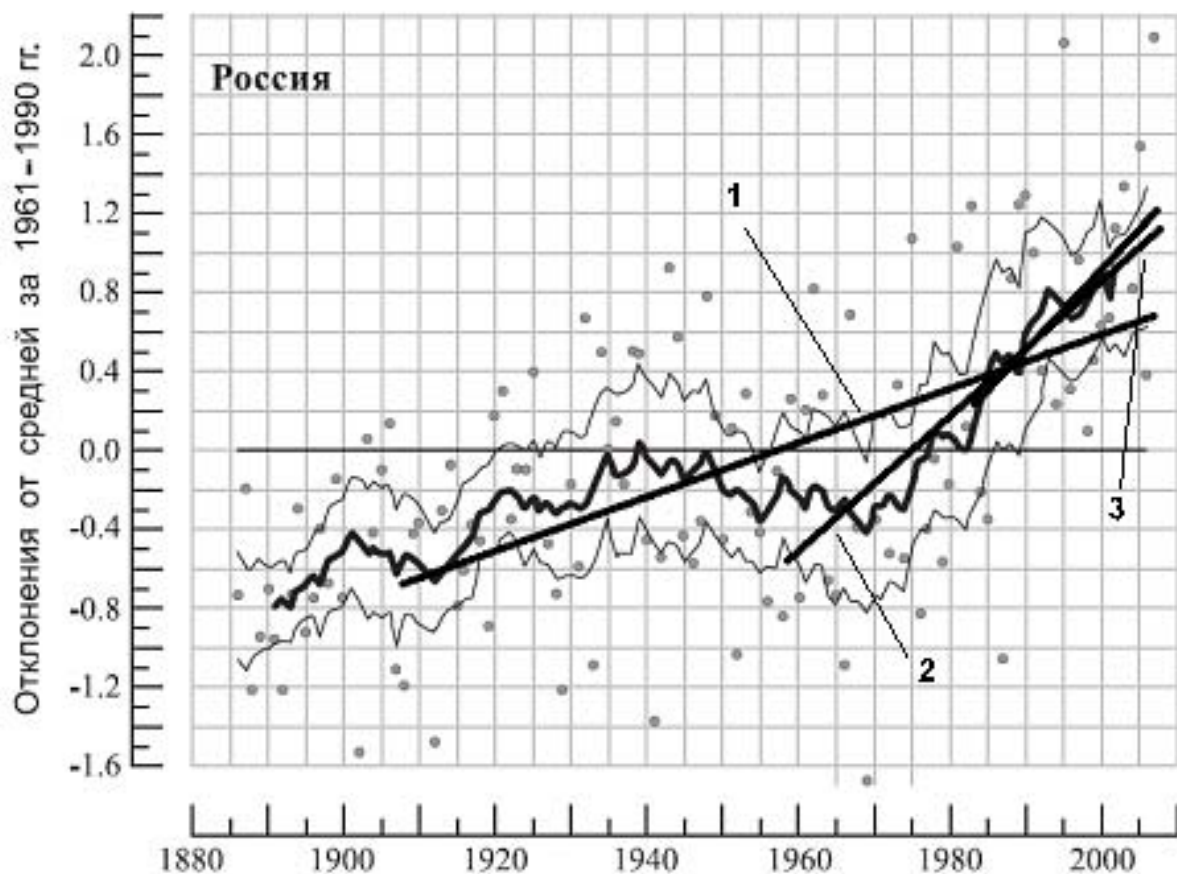


Рис. 2.1. Линейные тренды изменения температуры приземного воздуха, приведенные за периоды: 1 – 100 лет, 2 – 50 лет, 3 – 25 лет [9]

При очевидной хаотичности неосредненных данных (отдельные точки на графике), уже 11-летние скользящие средние (ломаная жирная линия) показывают явно выраженные тенденции изменения температуры со временем. Доверительный 95% интервал, показанный тонкими линиями, колеблется в относительно небольших пределах. Линейные тренды адекватно описывают картину изменения климатического параметра при периодах осреднения 25 и 50 лет; 100-летний период в данном конкретном случае представляется чрезмерно продолжительным, и не позволяющим своевременно учитывать динамику изменения рассматриваемого параметра.

Практическая невозможность получения достоверных прогнозов реального состояния атмосферы на периоды, сопоставимые со временем моделирования жизненного цикла объектов, находящихся под влиянием климатических изменений, приводит к необходимости привлечения средних, наиболее типичных для рассматриваемого участка территории, параметров состояния атмосферы. Совокупность этих параметров представляет собой формализованное описание климата в определенный момент (период) времени, и характеризует некоторый среднестатистический год, который обладает следующими особенностями.

Количество и виды климатических параметров, характеризующих среднестатистический год, устанавливается исходя из целей моделирования. При этом должна быть обеспечена возможность определения значения любого параметра в произвольный момент времени в течение этого года.

Для количественной оценки параметров базового среднестатистического года, соответствующего климату, принятому при создании действующих норм проектирования объектов транспортной инфраструктуры (базовый климат), используются усредненные по достаточно большому периоду (несколько десятков лет) данные инструментальных климатических измерений. Предполагаемые изменения

(прогнозный климат) учитываются внесением в эти параметры соответствующих обоснованных изменений (поправок), с учетом чего формируется прогнозный среднестатистический год.

Среднестатистический год не может быть поставлен в соответствие какому-либо конкретному календарному году. Соответственно, значения любого из климатических параметров, изменяющиеся на протяжении этого года, также не предполагают совпадения со значениями в аналогичные моменты реальных календарных лет.

При рассмотрении периодов моделирования продолжительностью более года, они представляются как последовательность повторяющихся и одинаковых среднестатистических лет. При этом с увеличением продолжительности периода моделирования предполагается повышение точности получаемых результатов.

Формализованное описание среднестатистического года  $C(t)$  представляет собой множество функций, позволяющих определить значения каждого из  $n$  климатических параметров  $c_i$  в произвольный момент времени  $t$ :

$$C(t) = \begin{bmatrix} c_1(t) \\ \dots \\ c_n(t) \end{bmatrix}, t \in [0; t_{\max}], \quad (2.1)$$

где  $t = 0$  соответствует 1 января (0 часов 00 минут), а  $t = t_{\max} - 31$  декабря (24 часа 00 минут). Поскольку продолжительность среднестатистического года составляет 365 суток,  $t_{\max} = 31\,536\,000$  с.

Основные осредненные результаты многолетних климатических наблюдений, являющиеся наиболее достоверной и репрезентативной статистической основой для определения параметров базового среднестатистического года, сосредоточены в территориально-дифференцированных климатических справочниках, аналогичных [13]. Приведенные в справочниках результаты могут быть получены осреднением за достаточно большие промежутки времени (например, в [13] ряд наблюдений температуры воздуха

охватывает период с 1882 по 1980 год). Такой длительный период осреднения, как было показано ранее, является чрезмерным. В этом случае для перехода от средней многолетней температуры, вычисленной за весь период наблюдений, к средней за 30-летний период (1931–1960 гг. или 1951–1980 гг., в зависимости от того, какой период используется в конкретных строительных нормах), дополнительно приводятся разности температур за указанные периоды (корректирующие таблицы). В случае если период осреднения не превышает 50 лет (например, средняя скорость ветра определена за период 1936-1980 гг.) дополнительная корректировка указанных в справочниках значений, как правило, не требуется.

## **2.2. Климатические параметры, влияющие на температурный режим вечномёрзлых и многолетнемерзлых грунтов**

Набор параметров  $c_1$ - $c_n$ , используемых для формализованного описания среднестатистического года (2.1), должен быть достаточным для достоверного определения температурного и физико-механического состояния грунта в произвольной точке грунтового массива и в произвольный момент времени в течение среднестатистического года. При моделировании теплопереноса между грунтовым массивом и окружающей средой, основными факторами, наиболее значимо влияющими на моделируемые процессы, являются следующие.

**Температура воздуха  $T_v$** , определяющая интенсивность теплообмена по линии соприкосновения верхнего уровня грунтового массива и нижнего уровня атмосферы (эта интенсивность зависит от  $\Delta T$  – разности температур воздуха и примыкающего к нему слоя грунта). При этом необходимо учитывать, что зависимость между  $\Delta T$  и темпами переноса тепла между грунтом и окружающей средой носит явно выраженный нелинейный характер, что объясняется в том числе и нестационарностью теплофизических параметров грунта (зависимостью их количественных значений от температуры). Соответ-

ственно, использование усредненных, в течение сколько-нибудь длительного периода среднестатистического года, значений температуры воздуха будет неизбежно вызывать существенные погрешности в результатах численного моделирования температурного режима грунта. Приемлемая точность моделирования может быть достигнута только при периодах усреднения температуры окружающего воздуха, не превышающих первых десятков минут, что вызывает необходимость определения в процессе численных расчетов модельных значений температуры в произвольные моменты времени. Это в свою очередь требует наличия алгоритмов, позволяющих на основе укрупненных климатических показателей, зафиксированных по результатам многолетних наблюдений, получать количественную оценку температуры воздуха для любого момента времени в течение года.

**Скорость ветра  $v_v$**  в приземном слое. С увеличением скорости ветра возрастает интенсивность отвода тепла от верхнего слоя грунта (если  $T_v < T_r$ ), или, наоборот, интенсивность поступления тепла в грунт (при  $T_v > T_r$ ). Также большое значение скорость ветра играет при оценке эффективности работы СОУ, когда нагретые пары хладагента охлаждаются в ребренной части конструкции; коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции воздуха изменяется, в зависимости от скорости воздушного потока, от 10 до более чем 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Аналогично температуре воздуха, при моделировании температурного режима грунта, скорость ветра также требуется определять для произвольных моментов времени, используя в качестве основы усредненные данные многолетних климатических наблюдений.

**Термическое сопротивление снегового покрова  $R_s$** , зависящее от его высоты  $d_s$  и теплопроводности  $\lambda_s$ . Теплопроводность снежной массы в первую очередь зависит от ее плотности  $\rho_s$ , которая не входит в число регулярно измеряемых климатических параметров, фиксируемых в климатических справочниках. Поскольку в течение зимнего периода суммарная продолжительность интервалов, когда на рабочей поверхности объекта транспортной инфраструктуры (дорожное полотно, железнодорожный путь, аэродромное покрытие и

т.д.) находятся значительные снежные массы, является незначительной, учет  $R_s$  при моделировании состояния грунта представляется нецелесообразным.

**Интенсивность жидких осадков**, измеряемая толщиной слоя выпавшей воды  $h_v$ . В весенний период такие осадки могут приводить к некоторому увеличению темпов оттаивания верхнего слоя грунта. В то же время, основная часть тепла, поступившего в оттаиваемый грунт с относительно теплым дождевым потоком, впоследствии удаляется из грунта при испарении избыточной воды. Кроме того, целью моделирования в настоящей работе является определение экстремальных, в течение среднестатистического года, прочностных и деформационных характеристик грунта, которые имеют место во второй половине летнего периода и не подвержены заметному влиянию на них достаточно небольших количеств тепла, приносимого осадками в весеннее время. По этой причине учет интенсивности жидких осадков также представляется нецелесообразным.

**Количество солнечной энергии  $E_c$** , поступившей в верхний слой грунта (теплопередача излучением). Необходимо отметить, что такой вид теплопередачи имеет место только при наличии прямого солнечного излучения, достаточно редкого и кратковременного в северных условиях; интенсивность поступления солнечной энергии при этом зависит от угла падения солнечных лучей на нагреваемую ими поверхность. В высоких широтах, характерных для криолитозоны России, даже максимально возможная в день летнего солнцестояния высота полуденного солнца заметно меньше  $60^\circ$  ( $53,5^\circ$  на  $60$ -градусной широте, с уменьшением на  $1^\circ$  при соответствующем увеличении географической широты). Соответственно, доля энергии, доставляемой в грунт за счет прямого солнечного излучения, в общем случае оказывается существенно ниже, чем получаемая за счет конвекционного обмена с окружающим воздухом. Учет  $E_c$  при моделировании теплового режима грунта является целесообразным только для объектов, особым образом расположенных на местности – имеющих наклонные поверхности, ориентированные под углами, близкими к

90°, к падающим на них солнечным лучам в летний период средне-статистического года.

Таким образом, наиболее значимыми параметрами, учитываемыми при моделировании температурного режима вечномёрзлых грунтов, являются температура воздуха и скорость ветра. В качестве фактографической основы для их количественной оценки используются:

- массив-вектор средних месячных температур воздуха **MT\_MID**, соответствующих рассматриваемой территории. Массив содержит 12 элементов (по количеству месяцев года) и формируется на основе многолетних климатических данных из табл. 2.1 соответствующего справочника по климату (нумерация таблиц во всех томах справочника идентичная);
- массив средних максимальных температур воздуха **MT\_MAX** (12 элементов, табл. 2.10);
- массив средних минимальных температур воздуха **MT\_MIN** (12 элементов, табл. 2.13);
- массив средних месячных скоростей ветра **MV\_MID** (12 элементов, табл. 3.3).

В процессе перехода от среднемесячных показателей к параметрам, соответствующим произвольным моментам времени моделируемого среднестатистического года, первоначально осуществляется аппроксимация среднемесячных значений с помощью кубических сплайнов:

$$c_{i,j}(t) = k_{1,j} + k_{2,j}t + k_{3,j}t^2 + k_{4,j}t^3, \quad (2.2)$$

где  $i$  – порядковый номер климатического параметра, используемого при описании среднестатистического года;  $j$  – порядковый номер сплайна (при 12 известных точках используется 11 сплайнов, т.е.  $j = 1, 2 \dots 11$ );  $0 \leq t \leq t_{\max}$  – время от начала среднестатистического года, измеряемое в сутках или в секундах.

Значения 44 коэффициентов для 11 сплайнов определяются решением системы уравнений, описывающих неразрывность сплайнов

в точках их соприкосновения и гладкость перехода сплайнов друг в друга:

$$\left. \begin{aligned} c_{i,j}(t_j) &= \mathbf{M}_j, & j &= 1, 2 \dots 11, \\ c_{i,j}(t_{j+1}) &= \mathbf{M}_{j+1}, & j &= 1, 2 \dots 11, \\ c'_{i,j}(t_{j+1}) &= c'_{i,j+1}(t_{j+1}), & j &= 1, 2 \dots 10, \\ c''_{i,j}(t_{j+1}) &= c''_{i,j+1}(t_{j+1}), & j &= 1, 2 \dots 10, \\ c'_{i,1}(t_1) &= 0, \\ c'_{i,11}(t_{12}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

где  $\mathbf{M}$  – массив-вектор со среднемесячными значениями  $i$ -го параметра;  $t_j$  – время, соответствующее  $j$ -му значению в массиве  $\mathbf{M}$ .

### 2.3. Вероятные сценарии климатических изменений и их формализованное описание

Прогнозы в отношении ожидаемых изменений климата можно разделить на две основные группы. К первой, достаточно малочисленной по общему количеству публикаций группе относятся прогнозы, затрагивающие отдельные основные показатели состояния атмосферы – температуру воздуха, влажность, количество осадков и т.д. Вторая, значительно более объемная группа прогнозов ориентирована на описание ожидаемых результатов климатических изменений, наиболее значимо сказывающихся на хозяйственной и экономической деятельности – изменении сроков периода отрицательных температур, повышении уровня моря, изменении речного стока, деградации вечномёрзлых толщ грунта. При этом выявления и дифференциации влияния на эти процессы отдельных климатических факторов, как правило, не производится.

В целом исследованию ожидаемых климатических угроз и рисков на северных территориях России посвящено достаточно большое количество работ. Систематизация и многоаспектный анализ общей картины предполагаемых климатических изменений является необходимой основой для их формализованного описания, выполняемого



с целью последующей количественной оценки ожидаемых последствий для объектов транспортной инфраструктуры.

В работе [14] на примере Чукотского полуострова рассмотрен механизм реакции ландшафтных компонентов на климатические изменения. Отмечено, что снижение несущей способности грунта при нарушениях геологической среды уже к настоящему времени составляет от 5-11% для территорий арктической тундры, до 12-25% в северных тундрах. Основными прогнозируемыми последствиями в отношении линейных объектов, в том числе дорожной сети, являются смещения и разрывы грунта и связанные с этим чрезмерные осадки и разрушение строительных конструкций и дорожного полотна. Главный экологический риск от климатических изменений прогнозируется в виде усиленной эрозии почв, примыкающих к дорожному полотну.

В работе [8] основными климатически обусловленными последствиями для дорожной сети северного региона принимаются увеличение продолжительности зимнего ледостава связанное с этим сокращение сроков функционирования автозимников для передвижения большегрузных машин. В отношении автозимников также прогнозируется более частое проявление наледных водотоков, ограничивающих движение. Для стационарной дорожной сети ожидается нарушение мерзлого слоя, выраженное в просадке грунтов на автомагистралях, рост числа опасных природно-климатических явлений (паводки, наводнения, снежные лавины, сели, ураганы, сильные осадки, чрезвычайная пожарная опасность), а также увеличение резких колебаний погоды. Как результат снижения функциональности дорожной сети региона, к середине XXI века ожидается сокращение досягаемости удаленных поселков на 13%, в сочетании с уменьшением примерно на 1 млн кв. км территории, на которой экономически целесообразно эксплуатировать зимники.

Разнонаправленное влияние изменения климата на функционирование автотранспортных систем показано в [28]. Отмечено, что сокращение продолжительности периода с отрицательными темпера-

турами воздуха является фактором, благоприятствующим эксплуатации автотранспортных средств, но негативно влияющим на состояние автотранспортной инфраструктуры. При этом снижение функциональности инфраструктурных элементов наблюдается уже в настоящее время. Основным климатически обусловленным проявлением считается ускоренное разрушение покрытия, вызываемое совместным действием комплекса факторов: увеличением количества переходов температур воздуха через 0 °С, избыточным увлажнением покрытия жидкими осадками, размягчением асфальтового покрытия в летние дни с экстремально высокими температурами воздуха, чрезмерными просадками из-за сверхнормативного оттаивания грунтов в основании автодорог. Прогнозируемое возрастание среднегодового количества осадков (твердых и жидких) также негативно повлияет на безопасность дорожного движения и потребует принятия специальных мер по уменьшению скользкости на дорогах.

На многих участках автотрассы «Колыма» в течение последних лет фиксируются аномально высокие количества жидких осадков; в частности, в июле 2013 года зафиксировано выпадение более 200 мм осадков, что близко к полугодовой норме [16]. Наряду с эрозийными процессами, в период дождей существенное развитие получают суффозионный и мерзлотный процессы, появляются значимые по своим масштабам опасные гравитационные явления – обвалы и вывалы горных пород, осыпи, оползни. Данная картина служит ярким примером комплексно проявляющихся последствий климатических изменений, обусловленных отличием фактических условий эксплуатации дорожной сети от условий, принятых при ее проектировании.

Влияние климатических изменений на среднегодовую дату становления безопасной несущей способности ледовых переправ и болотистых дорог рассмотрено в [5]. Показано, что уже в настоящее время эта дата постоянно отодвигается на все более позднее время, что сокращает сроки эксплуатации тяжелой техники в труднодоступных северных районах.

Значимым следствием климатических изменений является повышение вероятности возникновения и увеличение интенсивности чрезвычайных ситуаций природного характера. В работе [1] систематизированы и проанализированы основные риски природных ЧС, затрагивающих, в том числе и автодорожную сеть. Риски лесных и степных пожаров, на долю которых в России в среднем приходится около 25% всех ЧС природного характера, возросли за последние тридцать лет: на юге Сибири – на 20-39%, в высокоширотной части Дальнего Востока – на 20-90%, при устойчивом сохранении данной тенденции. Среди наиболее опасных гидрометеорологических явлений, характерных для северных территорий, отмечены сильные ветры, метели, дожди, гололедно-изморозевые отложения. Повышение частоты и масштабов наводнений прогнозируется, в первую очередь, на территориях Восточной Сибири, Архангельской области, Республики Коми.

Несомненно, наиболее значимые негативные последствия климатических изменений в криолитозоне России заключаются в сверхнормативном оттаивании вечномерзлых и многолетнемерзлых грунтов. В результате существенно снижается несущая способность грунта, что приводит к неравномерным осадкам и разрушению дорожного полотна, чрезмерным деформациям и обрушению объектов инженерной инфраструктуры.

По имеющимся оценкам [2], область высоких широт будет в наибольшей степени подвержена глобальным климатическим изменениям, что приведет к заметной деградации вечной мерзлоты криолитозоны России, а также к существенному сокращению ее территории. В Северной Евразии (территория России) в период до 2050 года прогнозируется общее сокращение площади вечной мерзлоты на величину от 13% до 22%, причем наиболее быстрое сокращение площади ожидается в зонах неустойчивой вечной мерзлоты – прерывистой и островной. Возрастание глубины сезонного оттаивания прогнозируется от 15-25% (Западная Сибирь) до 40-50% (Чукотка и Дальний Восток). В то же время необходимо отметить, что темпы потепления климата, принятые при составлении и обосновании данных

прогнозов (повышение температуры воздуха на 8 °С в течение последующих 80 лет), представляются чрезмерно завышенными. Соответственно, полученные при этих предположениях оценки скорости деградации вечной мерзлоты и возрастания соответствующего риска в отношении элементов транспортных систем также можно считать завышенными.

Более реалистичными можно считать результаты моделирования, выполненные в [33]. Показано, что в период 1981–2000 гг. изменение мощности сезонно-талого слоя под воздействием глобальных климатических изменений не превосходит величин, обуславливаемых естественной изменчивостью климата; таким образом, зафиксированные в течение этого времени колебания глубин оттаивания фактически представляют собой «информационный шум», не связанный с антропогенным воздействием на окружающую среду. Вместе с этим ожидается, что в период 2041–2060 гг. увеличение мощности сезонно-талого слоя уже будет обусловлено именно антропогенными факторами, под влиянием которых потепление будет заметно более значительным, чем в конце XX века. В частности, для центральных регионов Сибири к середине XXI века ожидается изменение (увеличение) глубины сезонного оттаивания в диапазоне 30-60 см для суглинков и 0-30 см для торфяных почв. Такая величина дополнительного оттаивания означает весьма высокие риски повреждения объектов транспортной инфраструктуры.

Динамика изменения температуры воздуха является главным фактором, наиболее значимо влияющим на риски утраты функциональности расположенных в криолитозоне объектов транспортной инфраструктуры. При этом принципиально возможны следующие сценарии проявления климатических изменений.

*Сценарий 1* – равномерное возрастание температуры воздуха в течение всего периода моделирования. Базовым параметром, определяющим интенсивность изменения климата, при этом является  $\tau_T$  – ожидаемое повышение температуры воздуха за 1 год, °С/год. Прогнозное значение температуры  $T$  в момент времени  $t$ :

$$T(t) = T_0(t) + \tau_T \frac{t - t_{\text{start}}}{t_{\text{year}}}, \quad (2.4)$$

где  $T_0(t)$  – температура воздуха при современном (неизменном) состоянии климата, определяемая в пределах среднестатистического года на основе (2.2)-(2.3);  $t_{\text{start}}$  – момент начала периода моделирования;  $t_{\text{year}}$  – продолжительность среднестатистического года.

*Сценарий 2* – повышение среднегодовой температуры среднестатистического года, который в дальнейшем считается неизменным на протяжении всего периода моделирования. Увеличение среднегодовой температуры на величину базового, с точки зрения характеристики климатических изменений, параметра  $\Delta T$  (°C), осуществляется за счет скачкообразного повышения температуры во все моменты года:

$$T(t) = T_0(t) + \Delta T. \quad (2.5)$$

*Сценарий 3* – стохастические колебания температуры воздуха в течение периода моделирования, с сохранением общей тенденции ее повышения на протяжении всего рассматриваемого периода. Базовыми параметрами в этом сценарии являются ожидаемое годовое повышение температуры  $\tau_T$ , °C/год, и коэффициент вариации температурного приращения  $\mu_T$ , выраженный в процентах от  $\tau_T$ . Таким образом, в любой момент времени в течение периода моделирования изменение температуры по сравнению с ее значением для среднестатистического года при современном состоянии климата, является случайной величиной  $\tilde{\Delta}$ . Предполагается, что  $\tilde{\Delta}$  распределена по нормальному закону, параметры которого изменяются со временем (т.е.  $\tilde{\Delta}$  является нестационарной величиной):

$$f(\Delta, t) = \frac{1}{\mu_T \tau_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\Delta - \tau_T \frac{t - t_{\text{start}}}{t_{\text{year}}}\right)^2}{2(\mu_T \tau_T)^2}}. \quad (2.6)$$

Температура воздуха в произвольный момент времени:

$$T(t) = T_0(t) + \Delta_t, \quad (2.7)$$

где  $\Delta_t$  – случайная реализация  $\tilde{\Delta}$ , полученная в соответствии с (2.6). При этом вполне возможны отдельные реализации  $\Delta_t < 0$ , что означает локальное понижение температуры воздуха по сравнению с текущим состоянием климата.

*Сценарий 4* – изменение контрастности климата. Под контрастностью в данном случае понимается соотношение между накопленными температурами в летний и зимний периоды:

$$T_C = \sum_{T>0} T - \sum_{T<0} T, \quad (2.8)$$

где суммирования выполняются по всем дням среднестатистического года. Изменение контрастности учитывается базовым параметром  $\tau_C$ ; при  $\tau_C > 1$  предполагается повышение контрастности температур в течение среднестатистического года, а при  $\tau_C < 1$  – снижение. При данном сценарии модельное значение температуры воздуха определяется как:

$$T(t) = T_0(t) \tau_C. \quad (2.9)$$

### Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ ГРУНТА В ОСНОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

#### 3.1. Моделирование теплофизических параметров грунта

Исходными данными при моделировании зависящих от температуры параметров вечномёрзлых грунтов являются их физические характеристики, определяемые по результатам испытаний.

*Суммарная влажность мерзлого грунта  $W_{\text{tot}}$ .* Образец мерзлого грунта массой 0,5-2 кг (в зависимости от криогенной текстуры грунта) доставляется к месту проведения лабораторных исследований в оболочке, гарантирующей полную сохранность влаги в образце. После полного оттаивания образец перемешивается до однородной массы; при наличии видимых неоднородностей (включений), кроме льда, они удаляются из образца. Далее осуществляется высушивание при температуре  $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$  в течение 3 ч для песчаных грунтов, и 5 ч – для глинистых. После взвешивания образца определяется суммарная влажность (в %):

$$W_{\text{tot}} = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m}, \quad (3.1)$$

где  $m_1$  – масса влажного грунта с тарой, г;  $m_0$  – масса высушенного грунта с тарой, г;  $m$  – масса пустой тары, г.

*Влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями  $W_m$ .* Определяется аналогично  $W_{\text{tot}}$ , но перед оттаиванием образца из него удаляются все ледяные включения.

*Суммарная льдистость мерзлого грунта  $i_{\text{tot}}$*  определяется как:

$$i_{\text{tot}} = \frac{\rho_f (W_{\text{tot}} - W_w)}{\rho_i (1 + W_{\text{tot}})}, \quad (3.2)$$

где  $\rho_f$  – плотность мерзлого грунта, г/см<sup>3</sup> (см. 3.3);  $\rho_i$  – плотность льда, принимаемая равной 0,9 г/см<sup>3</sup>;  $W_w$  – влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды в его естественном состоянии.

*Плотность сухого грунта (скелета)  $\rho_d$ .* Предварительно определяется плотность грунта в его естественном состоянии  $\rho_f$ . При использовании для этой цели метода режущего кольца, в зависимости от вида и состояния грунта, выбираются размеры кольца-пробоотборника, для которого вычисляется его внутренний объем  $V$  (см<sup>3</sup>). Далее кольцо полностью заполняется грунтом, с соблюдением требования об отсутствии уплотнения или разуплотнения грунта по сравнению с его естественным состоянием, и закрывается пластинками с двух сторон. Производится взвешивание кольца с грунтом и пластинками; плотность грунта определяется как:

$$\rho_f = \frac{(m_1 - m_0 - m_2)}{V}, \quad (3.3)$$

где  $m_1$  – масса грунта с кольцом и пластинками, г;  $m_0$  – масса кольца, г;  $m_2$  – масса пластинок, г. Плотность сухого грунта определяется как:

$$\rho_d = \frac{\rho_f}{1 + 0,01W_{\text{tot}}}. \quad (3.4)$$

*Степень засоленности грунта  $D_{\text{sal}}$ , %.* Данная характеристика определяет относительное содержание в грунте водорастворимых солей и вычисляется как отношение массы солей  $g_s$  к массе сухой навески грунта  $g_d$  (включая массу содержащихся в ней солей):

$$D_{\text{sal}} = 100 \frac{g_s}{g_d}. \quad (3.5)$$

*Тип грунта.* В основу разделения грунтов по типам положено число пластичности  $I_p$ . В зависимости от значения данного показателя, выделяются 4 типа грунтов: пески ( $I_p \leq 0,02$ ), супеси ( $0,02 < I_p \leq 0,07$ ), суглинки ( $0,07 < I_p \leq 0,17$ ), глины ( $0,17 < I_p$ ).

На основе исходных физических характеристик грунта определяются следующие теплофизические параметры.

*Концентрация порового раствора  $C_{ps}$ ,* которая характеризует степень минерализации грунтовой влаги. Сначала вычисляется



влажность засоленного грунта  $W$ , принимаемая для грунтов с льдистостью  $i_{\text{tot}} \leq 0,4$  равной  $W_{\text{tot}}$ , а с  $i_{\text{tot}} > 0,4$  равной  $W_{\text{m}}$ . Далее определяется концентрация порового раствора:

$$C_{\text{ps}} = \frac{D_{\text{sal}}}{D_{\text{sal}} + 100W} \quad (3.6)$$

*Температура начала замерзания грунта  $T_{\text{bf}}$ :*

$$T_{\text{bf}} = A - B(53C_{\text{ps}} + 40C_{\text{ps}}^2), \quad (3.7)$$

где  $A$  – коэффициент, характеризующий температуру начала замерзания незасоленного грунта, определяемый, в зависимости от вида грунта;  $B$  – коэффициент, зависящий от типа засоления грунта (морское или континентальное), при отсутствии засоления принимается  $B = 0$ .

*Влажность грунта за счет незамерзшей воды  $W_{\text{w}}$ .* В случае, когда грунт находится в оттаявшем состоянии ( $T > 0$  °C) принимается  $W_{\text{w}} = W_{\text{tot}}$ . Для охлажденного грунта, когда  $T_{\text{bf}} < T \leq 0$ , при льдистости грунта  $i_{\text{tot}} \leq 0,4$  принимается  $W_{\text{w}} = W_{\text{tot}}$ , а в противном случае  $W_{\text{w}} = W_{\text{m}}$ . Для грунта в мерзлом состоянии ( $T \leq T_{\text{bf}}$ ):

$$W_{\text{w}} = k_{\text{w}} W_{\text{p}} + \eta D_{\text{sal}}, \quad (3.8)$$

где  $k_{\text{w}}$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от типа грунта и его температуры;  $W_{\text{p}}$  – влажность грунта на границе пластичности (раскатывания), доли единицы (при отсутствии экспериментальных данных принимаются значения, средние для типа рассматриваемого грунта);  $\eta$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от типа грунта и его температуры (для незасоленных грунтов  $\eta = 0$ ).

Зависящая от температуры грунта его *объемная теплоемкость*  $C(T)$ , Дж/(кг·°C). В зависимости от типа грунта определяется расчетное значение удельной теплоемкости его скелета  $C_{\text{p}}$ . Удельная теплоемкость незамерзшей воды для незасоленного грунта в оттаявшем состоянии принимается  $C_{\text{w}} = 4200$  Дж/(кг·°C). При наличии засоления

либо температуре грунта  $T < 0$  °C выявляется расчетное значение удельной теплоемкости порового раствора  $C_{wt}$ , после чего определяется:

$$C_w = C_{wt} - 4550C_{ps}. \quad (3.9)$$

Для грунтов, находящихся в талом или охлажденном состоянии, их объемная теплоемкость  $C_{th}$  определяется как:

$$C_{th} = (C_p + C_w W_{tot}) \rho_d. \quad (3.10)$$

Объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии  $C_f$ :

$$C_f = [C_p + C_w W_w + C_i (W_{tot} - W_w)] \rho_d, \quad (3.11)$$

где  $C_i$  – удельная теплоемкость льда, определяемая при заданной температуре грунта как  $C_i = 2120 + 7,8T$ .

*Теплопроводность грунта в талом и охлажденном состояниях*  $\lambda_{th}$  (при  $T > T_{bf}$ ), а также *в мерзлом состоянии*  $\lambda_{fm}$  (при  $T \leq -15$  °C), Вт/(м·°C). Данные теплофизические характеристики определяются в зависимости от типа грунта (суглинки и глины при этом не разделяются), его суммарной влажности  $W_{tot}$  и плотности в высушенном состоянии  $\rho_d$ , а также степени засоленности. По последнему показателю выделяются незасоленные грунты ( $D_{sal} < 0,5\%$ ), слабозасоленные ( $0,5\% \leq D_{sal} < 2,0\%$ ), средnezасоленные ( $2,0\% \leq D_{sal} < 5,0\%$ ) и сильнозасоленные ( $5,0\% < D_{sal}$ ).

*Теплопроводность грунта при заданной температуре*  $\lambda(T)$ . В случае  $T > T_{bf}$  принимается  $\lambda = \lambda_{th}$ , а при  $T \leq -15$  °C  $\lambda = \lambda_{fm}$ . Для нахождения теплопроводности грунта у незасоленных и засоленных грунтов в мерзлом состоянии в диапазоне температур  $T_{bf} \geq T > -15$  °C используется соотношение:

$$\lambda(T) = \lambda_{fm} - (\lambda_{fm} - \lambda_{th}) \frac{W_w(T) - W_w(T_m)}{W_{tot} - W_w(T_m)}, \quad (3.12)$$

где  $T_m = -15$  °C.

Величина объемной теплоты замерзания (таяния) грунта  $L_v$  (Дж/м<sup>3</sup>) принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта, и определяется как:

$$L_v = L_0 (W_{\text{tot}} - W_w) \rho_d, \quad (3.13)$$

где  $L_0 = 3,35 \cdot 10^5$  Дж/кг – значение удельной теплоты фазовых превращений вода-лед; значение влажности грунта за счет незамерзшей воды определяется при условии  $T_{\text{bf}} \geq T$ .

### **3.2. Моделирование теплообмена между грунтовым массивом и окружающей средой**

При моделировании температурной динамики грунта предполагается, что теплообмен осуществляется в вертикальном направлении, что обусловлено изменениями в течение периода моделирования температурных параметров примыкающего к грунту воздуха, и, соответственно, переносом тепла в грунт или из грунта. В случае отсутствия различий в конфигурации грунтового массива в двух горизонтальных направлениях (ровная поверхность, характерная, в частности, для аэродромного покрытия), перенос тепла по вертикали является единственным моделируемым процессом; таким образом, множество точек равных температур в грунтовом массиве в любой момент времени образуют строго горизонтальные плоскости. В общем случае конфигурации грунтового массива (рис. 3.1) имеет место его неоднородность в одном из направлений (на рис. 3.1 обозначенном осью  $x$ ), что приводит к необходимости моделирования теплообмена одновременно в направлениях  $y$  и  $x$ . В результате точки с одинаковыми температурами образуют изогнутые линии (изолинии) в плоскости  $x$ - $y$ , и прямые горизонтальные линии в плоскости  $y$ - $z$ . Таким образом, все сечения трехмерного грунтового массива плоскостью  $x$ - $y$  в любой конкретный момент времени будут описываться одинаковыми температурными изолиниями. Иными словами, температурная характеристика грунта не зависит от координаты  $z$ , что достаточно

очевидно, например, для грунтового массива, образующего прямолинейный дорожный профиль (координата  $z$  здесь определяет местоположение вдоль дороги). Наличие в грунте инженерных сооружений (сезонного охлаждающего устройства на рис. 3.1, либо свайного фундамента) формально описывается как совокупность линейных отрезков, обозначаемых координатами своих начальной и конечной точек.

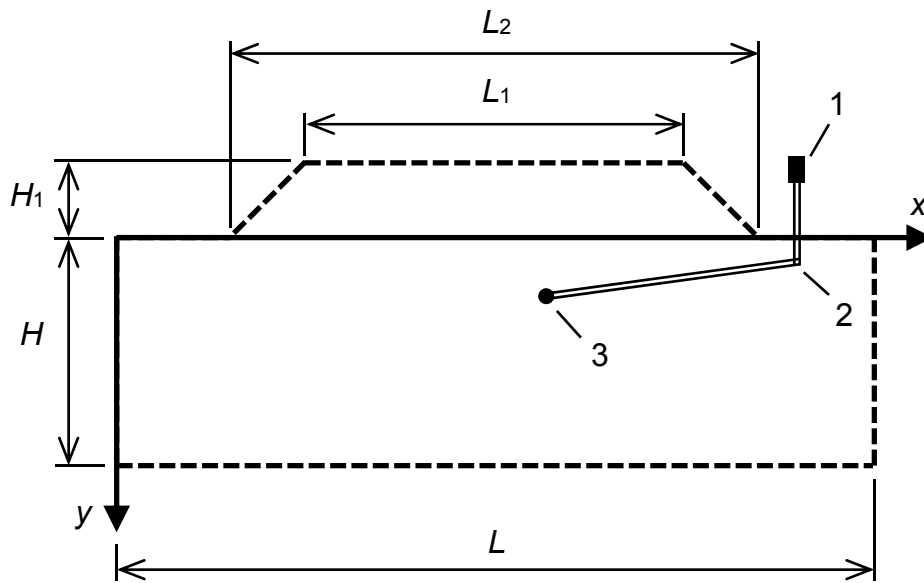


Рис. 3.1. Размеры грунтового массива, рассматриваемого при моделировании теплообмена (1, 2, 3 – точки, координаты которых описывают положение СОУ)

Грунтовой массив представляется в виде отдельных прямоугольных элементов, размеры которых в плоскости моделирования теплопереноса, равные  $\delta_x$  и  $\delta_y$ , назначаются исходя из требований точности получаемых численных результатов, в первую очередь сходимости вычислительного процесса. В направлении, перпендикулярном плоскости  $x$ - $y$ , принимается  $\delta_z = 1$  м.

Выделяется 4 типа расчетных элементов, определяющих особенности теплообмена между соседними элементами (рис. 3.2).

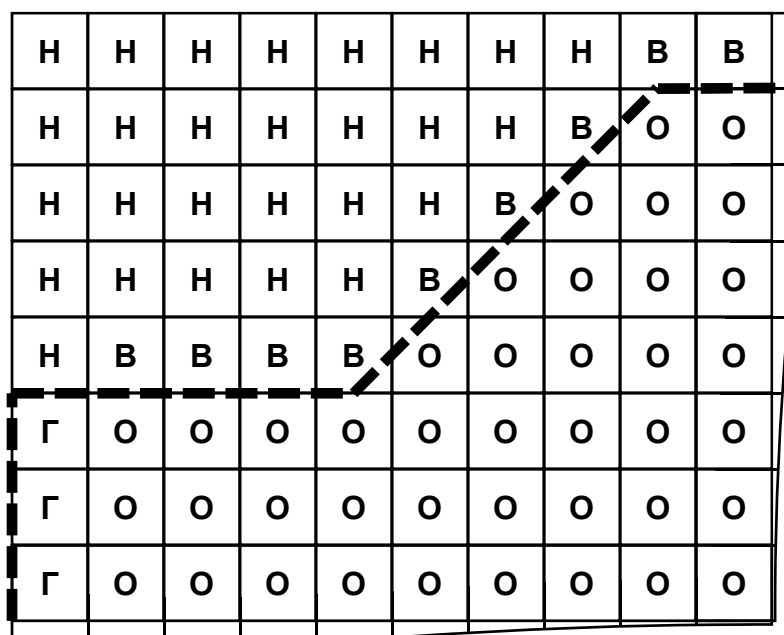


Рис. 3.2. Типы расчетных элементов в модели теплообмена (**О** – основной грунт, **Г** – грунт на границе расчетной области, **В** – воздух на границе грунтового массива, **Н** – элементы, не участвующие в теплообмене)

**Тип 1** («О» на рис. 3.2). Основной грунт в массиве; для каждой ячейки возможно как поступление тепла, так и теплоотдача.

**Тип 2** («Г»). Грунт на границе рассматриваемого сечения  $x$ -у грунтового массива. Для левой и правой границ массива температура принимается равной температуре соседних с ней ячеек типа 1. Соответственно, для минимизации влияния «эффекта термоса» вертикальные границы моделируемого грунтового массива должны располагаться достаточно далеко от любых горизонтальных неоднородностей (выступающего над поверхностью дорожного профиля или расположенных в грунте элементов инженерных сооружений). Грунт на нижней горизонтальной границе предполагается имеющим постоянную температуру, которая не меняется в процессе теплообмена с вышележащими элементами; таким образом учитывается бесконечно большая тепловая инерция глубоко расположенных вечномерзлых толщ грунта. Глубина моделирования ( $H$  на рис. 3.1) при этом должна быть на уровне глубины затухания сезонного изменения температур в грунте.

**Тип 3 («В»).** Воздух, соприкасающийся с верхней границей грунтового массива. Изменение температуры воздуха учитывается в соответствии с ее суточным и годовым ходом, на который теплообмен между воздухом и грунтом влияния не оказывает.

**Тип 4 («Н»).** Нерасчетные элементы (воздух, не соприкасающийся с грунтом). Наличие элементов этого типа обусловлено прямоугольной формой области моделирования, в которой появляются элементы, не участвующие в теплообмене.

При моделировании теплообмена он рассматривается по поверхностям соприкасающихся элементов, в направлениях  $x$  и  $y$ . Поскольку изменение температуры моделируется только для ячеек с основным грунтом, возможны три варианта теплообмена, учитываемого при моделировании.

Между двумя ячейками 1-го типа (вариант 1) количество тепла  $Q$ , переносимого за время  $\Delta T$  (период, в течение которого все параметры расчетных элементов считаются неизменными):

$$Q = \frac{0,5(\lambda_1 + \lambda_2)}{\delta_{x/y}} (t_1 - t_2) \delta_{y/x} \delta_z \Delta T, \quad (3.14)$$

где  $Q > 0$  соответствует отдаче тепла более нагретым элементом 1, а  $Q < 0$  – соответственно, получению им тепла от элемента 2;  $\lambda_1$  и  $t_1$  – зависящая от температуры теплопроводность грунта и температура для элемента 1;  $\lambda_2$  и  $t_2$  – то же для элемента 2.

Перенос тепла между элементами 1-го и 2-го типа на вертикальной границе грунтового массива (вариант 2) рассчитывается по (3.14), после чего температура граничного элемента принимается равной температуре элемента, соседнего с ним в направлении  $x$ .

Теплообмен между элементами 1-го и 3-го типа (вариант 3) моделируется на основе зависимости:

$$Q = 18v^{0,578} (t_g - t_a) \delta_x \delta_z \Delta T, \quad (3.15)$$

где  $Q > 0$  соответствует отдаче тепла элементом грунта, а  $Q < 0$  – соответственно, получению им тепла;  $v$  – средняя скорость ветра на

протяжении периода  $\Delta T$ , м/с, определяемая на основе многолетних результатов инструментальных наблюдений;  $t_g$  и  $t_a$  – температура грунта и воздуха соответственно.

Особым вариантом теплообмена является отвод тепла от грунта, осуществляемый с использованием специальных технических устройств – СОУ. Конструкция надземной части СОУ показана на рис. 3.3; она обеспечивает остывание и конденсацию паров хладагента (за счет теплоотдачи окружающему воздуху от стальных ребер и трубчатой части между ребрами). Таким образом, в зимний период обеспечивается создание дополнительной «подушки холода» в слоях грунта, примыкающих к подземной части СОУ, что способствует меньшему оттаиванию грунта в летний период, наиболее опасный с точки зрения возможного снижения функциональности объектов транспортной инфраструктуры.

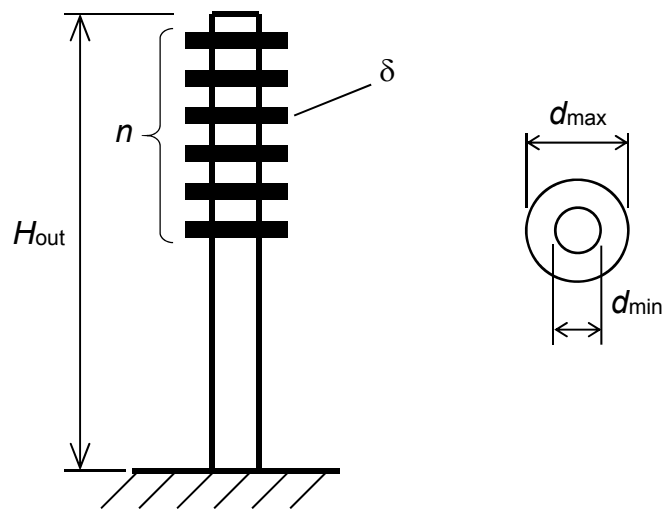


Рис. 3.3. Расчетная схема сезонного охлаждающего устройства ( $H_{out}$  – высота надземной части,  $\delta$  – толщина ребра,  $n$  – количество ребер,  $d_{min}$  – внешний диаметр трубчатой части,  $d_{max}$  – наружный диаметр ребра)

Численное моделирование процесса отвода тепла от грунта сезонным охлаждающим устройством осуществляется в следующей последовательности. Сначала определяется температура наружного воздуха  $t_a$ ; если она выше  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то СОУ не функционирует. Отвод тепла от грунта также не осуществляется, когда средняя температура

грунта в пределах подземной части  $t_g$  ниже, чем  $t_a$ ; условие работоспособности имеет вид  $\Delta t > 0$ , где  $\Delta t = t_a - t_g$ . Если проверка данных условий показала наличие рабочего цикла, рассчитывается размерный параметр  $m$ :

$$m = \sqrt{\frac{36v^{0,578}}{\lambda_s \delta}}, \quad (3.16)$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\lambda_s$  – теплопроводность стали, из которой изготовлен термостабилизатор, при текущей температуре воздуха, Вт/(м·°С);  $\delta$  – толщина ребра, м. Далее определяются безразмерные коэффициенты:

$$\beta_1 = 0,5m \cdot d_{\min}; \quad \beta_2 = 0,5m(d_{\max} + \delta), \quad (3.17)$$

где  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$  показаны на рис. 3.3, и рассчитывается параметр функции Бесселя:

$$\varphi = \frac{I_1(\beta_2)K_1(\beta_1) - I_1(\beta_1)K_1(\beta_2)}{I_0(\beta_1)K_1(\beta_2) + I_1(\beta_2)K_0(\beta_1)}. \quad (3.18)$$

Теплоотдача в воздух от одного ребра  $Q_1$  и от неоребренной части  $Q_0$ :

$$\begin{aligned} Q_1 &= \pi \cdot d_{\max} \cdot \delta \cdot m \cdot \lambda_s \cdot \Delta t \cdot \varphi, \\ Q_0 &= 18\pi \cdot (H_{\text{out}} - \delta n) \cdot d_{\min} \cdot \Delta t \cdot v^{0,578}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Суммарная теплоотдача от всей надземной части в целом:

$$Q = Q_1 n + Q_0. \quad (3.20)$$

Количество теплоты  $Q$ , отдаваемой за 1 секунду окружающему воздуху (и, соответственно, забираемой у грунта подземной частью), характеризует мощность СОУ. При моделировании это количество теплоты суммарно отбирается у элементов 1-го типа, непосредственно прилегающих к подземной части, пропорционально температуре грунта этих элементов.



### 3.3. Программная реализация процедуры моделирования температурного режима грунта

Моделирование температурного режима грунта включает в себя следующие основные этапы.

*Этап 1.* Ввод исходных данных для численного расчета осуществляется в виде тематически структурированных матриц (рис. 3.4):

$$\begin{aligned}
 DGeometry &:= \begin{pmatrix} "L\_in, м" & 20 \\ "H\_in, м" & 2 \\ "L1\_out, м" & 10 \\ "L2\_out, м" & 14 \\ "H1\_out, м" & 2 \end{pmatrix} & DGround &:= \begin{pmatrix} "W\_tot, 0-1" & 0.15 \\ "W\_m, 0-1" & 0.05 \\ "i\_tot, 0-1" & 0.01 \\ "D\_sal, %" & 1 \\ "Typ\_g" & 1 \\ "ρ, кг/м³" & 1600 \end{pmatrix} & DModel &:= \begin{pmatrix} "t0, C" & -7 \\ "Δx, м" & 0.1 \\ "Tstart, c" & 0 \\ "ΔT, c" & 600 \\ "Continue" & 0 \\ "N\_ΔT" & 6 \cdot 10^{-24} \end{pmatrix} \\
 DTermo &:= \begin{pmatrix} "δ, мм" & 2 & 2 \\ "d\_max, мм" & 100 & 100 \\ "d\_min, мм" & 60 & 60 \\ "n, штык" & 30 & 30 \\ "Distance, м" & 1 & 1 \\ "x1, м" & 18.05 & 1.95 \\ "y1, м" & -1.05 & -1.05 \\ "x2, м" & 18.05 & 1.95 \\ "y2, м" & 0.05 & 0.05 \\ "x3, м" & 11.05 & 8.95 \\ "y3, м" & 1.05 & 1.05 \end{pmatrix} & DClimate &:= \begin{pmatrix} "Month" & "Days" & "Tmid" & "Tmin" & "Tmax" & "v\_mid" \\ 1 & 31 & -37.3 & -40.9 & -32.9 & 1.6 \\ 2 & 28 & -34.7 & -38.8 & -30.1 & 1.5 \\ 3 & 31 & -26.9 & -33.6 & -20.3 & 1.6 \\ 4 & 30 & -14.6 & -22.8 & -7.8 & 2.1 \\ 5 & 31 & -0.3 & -6 & 5 & 2.7 \\ 6 & 30 & 11.1 & 5.8 & 16.6 & 2.9 \\ 7 & 31 & 13.5 & 8.6 & 19 & 2.6 \\ 8 & 31 & 9.9 & 5.1 & 15.5 & 2.4 \\ 9 & 30 & 2.8 & -1 & 7 & 2.2 \\ 10 & 31 & -11.3 & -14.9 & -7.9 & 1.9 \\ 11 & 30 & -27.5 & -31 & -23.6 & 1.8 \\ 12 & 31 & -35.1 & -38.7 & -31.1 & 1.6 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 3.4. Структура матриц с исходными данными: *DGeometry* – геометрия грунтового массива (рис. 3.1); *DGround* – физико-механические характеристики грунта; *DTermo* – конструктивные параметры СОУ и координаты точек, определяющих их размещение в грунте; *DClimate* – климатические характеристики среднестатистического года (среднемесячные температуры воздуха и скорость ветра); *DModel* – параметры численного моделирования, основными из которых являются дискретизация вычислительного процесса во времени и размеры расчетных элементов модели

*Этап 2.* Выполняется инициализация таблиц, необходимых для определения физико-механических и теплотехнических характеристик грунта при произвольной температуре. Далее производится

формирование основных рабочих массивов с характеристиками отдельных элементов грунта и вышележащего воздушного слоя. Двумерный массив **M** содержит расчетные элементы в пределах области моделирования; производится разбиение этой области на квадратные элементы со стороной  $\Delta x$  (указанной в исходном массиве **DModel**), а также определение типа каждого элемента (рис. 3.5). Рабочий массив **MT** образован значениями температуры грунта по каждому расчетному элементу. Первоначально температура всех элементов принимается равной  $t_0$  (из массива **DModel**). В структуре **MTypeQ** для каждого расчетного элемента указан вариант теплообмена со всеми соседними элементами. Структура **StructTermo** содержит описание конструктивных параметров СОУ и их положения в грунтовом массиве.

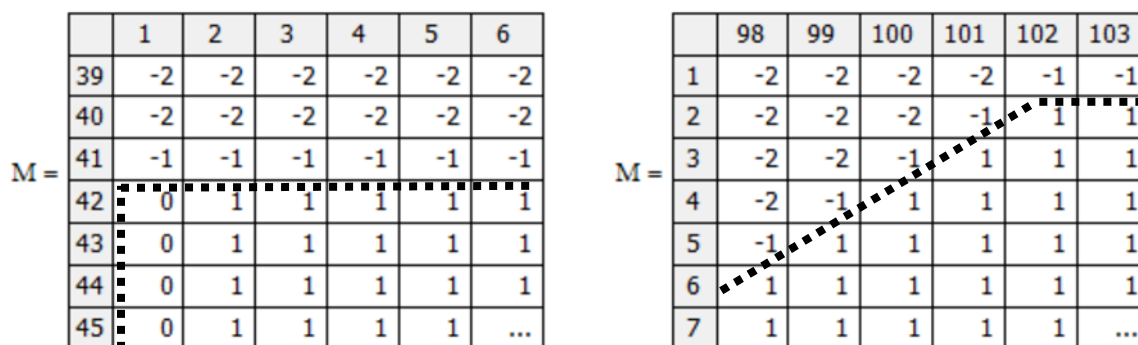


Рис. 3.5. Массив **M** с обозначением типов расчетных элементов (пунктиром показана граница грунта в соответствии с рис. 3.1): -2 – нерасчетный элемент; -1 – воздух на границе с грунтом; 0 – грунт на границе; 1 – основной (расчетный) грунт

**Этап 3.** Определяются климатические параметры (температура воздуха и скорость ветра) на протяжении среднестатистического года. Значения параметров разделены интервалами  $\Delta t$ , заданными в исходном массиве **DModel**. В дальнейшем, если период моделирования превышает 1 год, он предполагается состоящим из одинаковых, следующих друг за другом среднестатистических лет, с соответствующим повторением (через каждый год) моделируемых значений климатических параметров.

*Этап 4.* Рассчитываются значения температуры грунта, разделенные интервалами  $\Delta t$ . После каждой итерации вычислительного процесса обновляются текущие значения температур в массиве **MT**; таким образом, после выполнения  $N$ -й итерации массив содержит температуры грунта в момент  $N \cdot \Delta t$  после времени начала моделирования. На каждой итерации выполняются следующие действия.

- Определяются теплофизические характеристики расчетных элементов, соответствующие их температуре в начале итерации.
- Для каждого расчетного элемента, в зависимости от температуры соседних с ним элементов и вариантов теплообмена с ними, определяется поступившее или ушедшее тепло за период  $\Delta t$ ; в течение этого периода температуры всех элементов, равно как и их теплофизические характеристики, считаются неизменными. В результате формируется временный массив **MQ** с накопленными по каждому элементу значениями теплопотока.
- Исходя из средней температуры грунта в районе подземных частей СОУ, текущей температуры окружающего воздуха и скорости ветра определяется мощность каждого СОУ. Для расчетных элементов грунта, примыкающих к СОУ, определяется отводимое от них тепло за текущий период, которое учитывается в массиве **MQ**.
- На основе массива **MQ** и текущих значений теплофизических характеристик, для всех элементов определяется изменение температуры за период  $\Delta t$ . Обновленные значения температур заносятся в массив **M**, замещая в нем предыдущие значения.
- В случае если текущее время моделирования  $N \cdot \Delta t$  кратно периоду, дополнительно указанному для сохранения результатов, выполняется запись на диск температур грунта из массива **MT**.

*Этап 5.* Выполняется визуализация и анализ результатов моделирования. Для наглядного отображения температур грунтовых элементов разработана цветовая шкала, в соответствии с которой визуализируется массив **M**. Анализ результатов осуществляется с использованием дополнительных программных элементов, позволяющих определять глубину сезонного оттаивания грунта по отдельным

вертикальным профилям, проследить температурные изменения по выбранному профилю в течение года, сравнивать значения температур в выбранном элементе по годам моделирования, и так далее.

Основная структура программного модуля, реализованного в среде инженерного программирования MathCad, показана в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Основные программные элементы процедуры численного моделирования температурного режима вечномёрзлого грунта

№ п/п	Уровень	Наименование	Результат выполнения	Используемые процедуры и основные исходные данные
1	2	3	4	5
1.	1	LongTTbl()	Моделирование и запись на диск температуры грунта по расчетным периодам и элементам	F_C_ps() F_T_bf() F_w_w() F_λ0() F_C() F_λ() ModelGroundTempTbl() MakePΔt() MakeCells() MakeStructTermo() SaveManyMT()
2.	2	F_C_ps()	Определение концентрации порового раствора $C_{ps}$	<b>DGround</b>
3.	2	F_T_bf()	Определение температуры начала замерзания грунта $T_{bf}$	<b>DGround</b>
4.	2	F_W_w()	Определение влажности грунта за счет незамерзшей воды $W_w$	<b>DGround</b> $T_{bf}$ $T$
5.	2	F_λ0()	Определение теплопроводности грунта в талом и мерзлом состоянии $\lambda_{th}$ и $\lambda_{fm}$	<b>DGround</b>

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5
6.	2	F_C()	Определение объемной теплоемкости грунта $C$ при заданной температуре $T$	<b>DGround</b> $T_{bf}$ $T$
7.	2	F_λ()	Определение теплопроводности грунта $\lambda$ при заданной температуре $T$	<b>DGround</b> $T_{bf}$ $T$
8.	2	ModelGround-TempTbl()	Моделирование температурной динамики грунта на одном этапе	<b>DModel</b> <b>DGeometry</b> MakeCells() FillGround_t0() MakeStructTermo() Make_Typ_Q() CalcAddTermo() CalcMAdd() dtTbl()
9.	2	MakePΔt()	Значения температуры воздуха, скорости ветра и температуры нижнего слоя грунта по периодам моделирования	<b>DClimate</b> <b>DModel</b>
10.	2	SaveManyMT()	Сохранение на диске результатов моделирования по отдельным периодам и элементам	Множество массивов <b>MT</b>
11.	3	MakeCells()	Разбиение моделируемого массива грунта на расчетные элементы и определение их типа (рис. 4.2) в виде массива <b>M</b>	<b>DGeometry</b>
12.	3	FillGround_t0()	Установка начальной температуры по всем расчетным элементам	<b>M</b> <b>DModel</b>
13.	3	MakeStructTermo()	Создание единой структуры с данными обо всех используемых СОУ	<b>DTermo</b> <b>DGeometry</b> <b>DModel</b> CheckPlaceTermo() CalcLTermo()
14.	3	Make_Typ_Q()	Создание массива <b>MTypQ</b> с вариантами теплообмена с соседними элементами грунтового массива	<b>M</b>

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5
15.	3	CalcAddTermo()	Расчет теплоты, отбираемой СОУ, по отдельным элементам грунта	<b>M</b> QTotal()
16.	3	CalcMAdd()	Накопительный расчет количества поступившей или ушедшей теплоты по всем элементам на очередном интервале времени	<b>M</b> <b>MTypQ</b> CalcChangeQ()
17.	3	dtTbl()	Определение изменения температуры грунтового элемента в зависимости от количества поступившей или ушедшей теплоты	<b>M</b> <b>MQ</b> <b>MT</b>
18.	4	CheckPlaceTermo()	Определение длины подземной части СОУ в отдельных расчетных элементах грунта	<b>DTermo</b> <b>DGeometry</b> <b>M</b>
19.	4	CalcLTermo()	Определение длин надземной и подземной частей СОУ	<b>DTermo</b> <b>DGeometry</b> <b>M</b>
20.	4	QTotal()	Расчет мощности СОУ в зависимости от внешних условий	<b>DTermo</b> <b>DClimate</b> <b>MT</b>
21.	4	CalcChangeQ()	Расчет теплового потока в зависимости от перепада температур и типа теплообмена между элементами	<b>M</b> <b>MTypQ</b> <b>MT</b>

Основным программным элементом, используемым при выполнении моделирования, является LongTTbl(), с помощью которого можно как начать новый расчет, так и продолжить его после загрузки ранее сохраненных данных. Для сохранения текущих результатов применяется программный элемент SaveData(), который записывает на диск четыре массива с текущими результатами: **M**, **MT**, **ML** (информация о СОУ) и **MInfo** (данные о времени моделирования, которое соответствует температурам в **MT**). Обратная процедура – чтение с диска четырех файлов и их организация в структуру, пригодную для возобновления работы LongTTbl() – производится элементом

LoadData(). В случае, когда полученные результаты являются окончательными и продолжение моделирования не планируется, для сохранения на диск набора таблиц **MT** и описания структуры моделируемой области **M** применяется элемент SaveManyMT(), а для их загрузки (при последующем анализе) как единой структуры – элемент LoadManyMT(). Чтение с диска массивов с исходными данными, приведенными на рис. 3.4, производится программным элементом LoadStructureInputData().

### 3.4. Сравнительный анализ результатов моделирования

С целью проверки работоспособности алгоритмов для моделирования температурного режима грунтов и корректности их программной реализации, было выполнено 12 расчетов с различными сочетаниями параметров моделирования; нумерация моделей показана в табл. 3.2. Форма грунтового массива соответствовала рис. 3.1, его геометрические размеры, характеристики грунтовых и климатических условий приведены на рис. 3.4 (массивы **DGeometry**, **DGround** и **DClimate** соответственно). Параметры и расположение в грунте СОУ (в тех модельных расчетах, где они учитывались) также показаны на рис. 3.4 (массив **DTermo**).

Таблица 3.2

Нумерация тестовых моделей в зависимости от параметров моделирования (TC – количество учитываемых СОУ, Y – общая продолжительность периода моделирования, лет)

		Квант времени при моделировании, с		
		300	600	900
Пространственное раз- решение модели, см	7	1 (TC=0, Y=1)	4 (TC=0, Y=1)	7 (TC=0, Y=1)
	10	2 (TC=0, Y=1)	5 (TC=0, Y=1) 10 (TC=0, Y=5) 11 (TC=2, Y=1) 12 (TC=2, Y=5)	8 (TC=0, Y=1)
	15	3 (TC=0, Y=1)	6 (TC=0, Y=1)	9 (TC=0, Y=1)

Основными варьируемыми параметрами при тестовом моделировании являлись квант времени  $\Delta t$  (интервал, в течение которого все параметры модели считаются неизменными), и пространственное разрешение модели  $\Delta x = \delta_x = \delta_y$ . С увеличением  $\Delta t$ , при прочих равных условиях, снижаются затраты вычислительных ресурсов, но возможна потеря точности получаемых результатов. Уменьшение  $\Delta x$  приводит к уменьшению погрешности при замене грунтового массива множеством прямоугольных расчетных элементов, но одновременно возрастают объемы обрабатываемых данных, и снижается производительность вычислительного процесса. На рисунке 3.6 показано изменение температур в грунте на глубине 2 м по всей ширине моделируемой области.

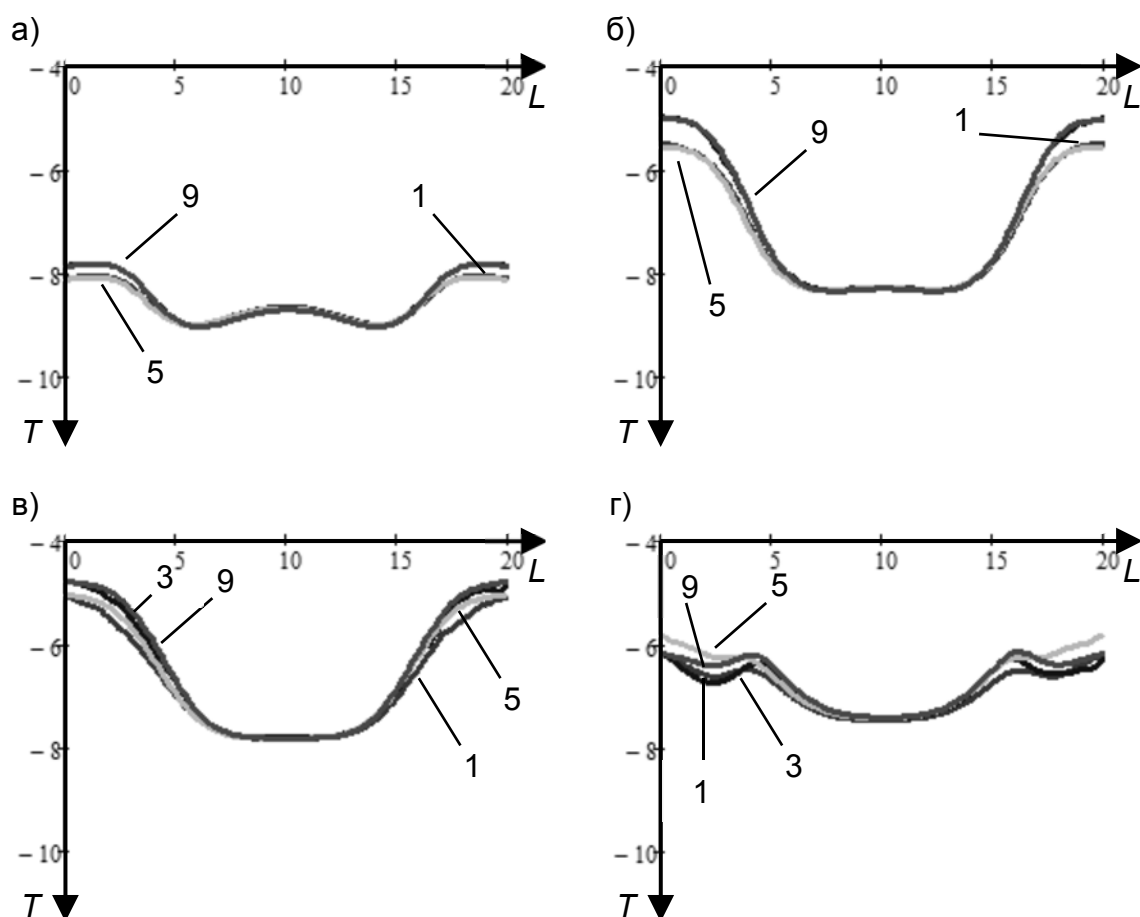


Рис. 3.6. Горизонтальный температурный профиль, °С, на глубине 2 м при периоде моделирования (от 1 января среднестатистического года): а) – 200 дней, б) – 250 дней, в) – 300 дней, г) – 350 дней; цифрами обозначены номера моделей по табл. 3.2



Можно видеть, что все 4 модели, показанные на рис. 3.6, обеспечивают весьма близкие результаты и, соответственно, используют корректные сочетания  $\Delta t$  и  $\Delta x$ . Незначительные отличия для моделей 3 и 9 объясняются неточностью описания рассматриваемой предметной области при  $\Delta x = 15$  см (некратностью этому параметру размера  $H_{in} = 2$  м).

Годовая динамика температурного режима вертикального профиля грунта, определенная по отдельным дням среднестатистического года, показана на рис. 3.7.

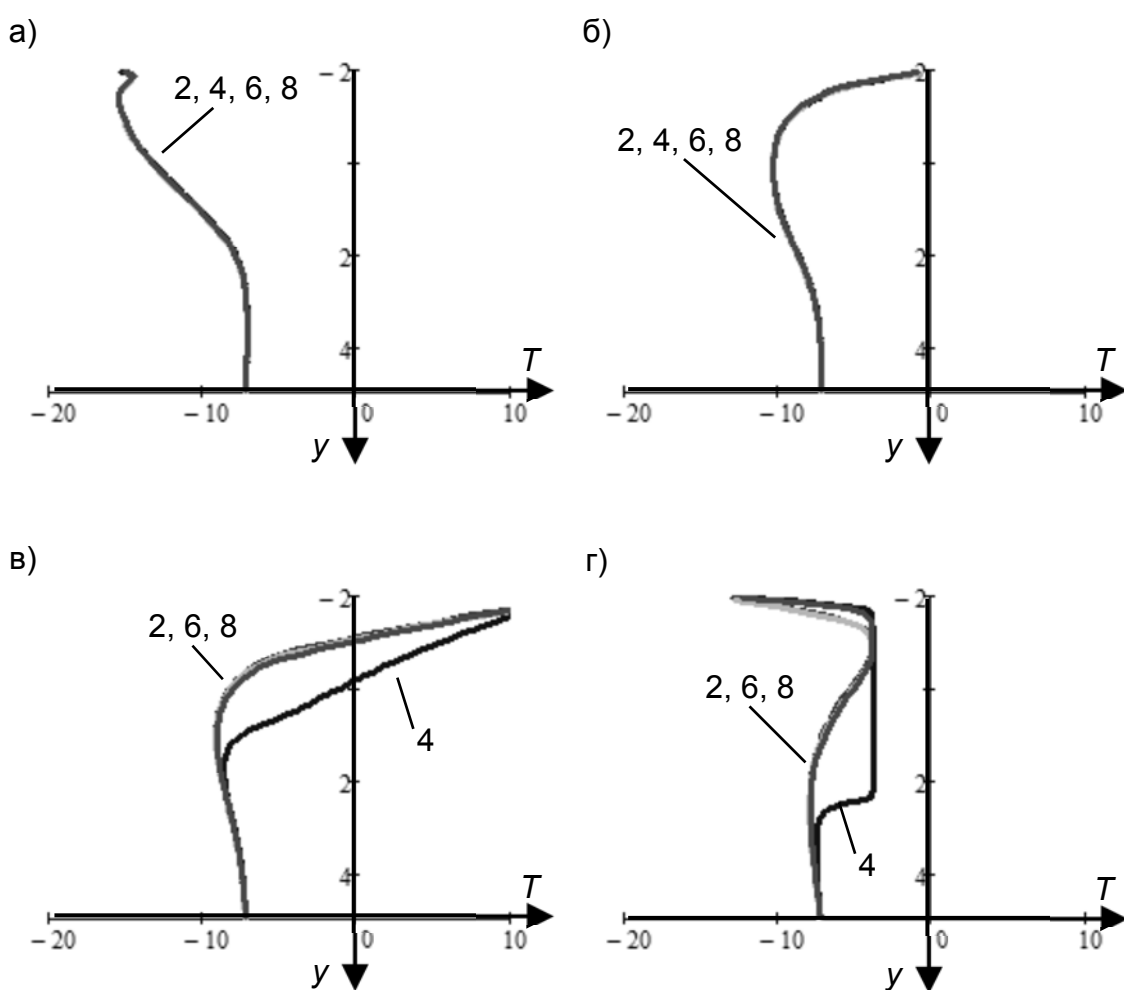


Рис. 3.7. Вертикальный температурный профиль, °C, в середине дорожного профиля ( $L = 2$  м) при периоде моделирования: а) – 100 дней, б) – 150 дней, в) – 200 дней, г) – 300 дней; цифрами обозначены номера моделей по табл. 3.2

Можно видеть, что все использованные модели до определенного момента (до 150-го дня среднестатистического года) обеспечивают практически тождественные результаты. Однако уже к 200-му

дню модель 4 ( $\Delta t = 600$  с и  $\Delta x = 7$  см) дает значительную погрешность, которая при продолжении моделирования нарастает, и к 300-му дню, очевидно, становится неприемлемо большой. К этому же времени начинает проявляться и погрешность в модели 8 ( $\Delta t = 900$  с и  $\Delta x = 10$  см).

Погрешности моделирования, наблюдаемые на рис. 3.7, свидетельствуют о начале расходимости вычислительного процесса, а значит, о несовместимости использованных параметров моделирования  $\Delta t$  и  $\Delta x$ . На рисунке 3.8 можно видеть постепенное нарастание погрешностей и их распространение по моделируемой области.

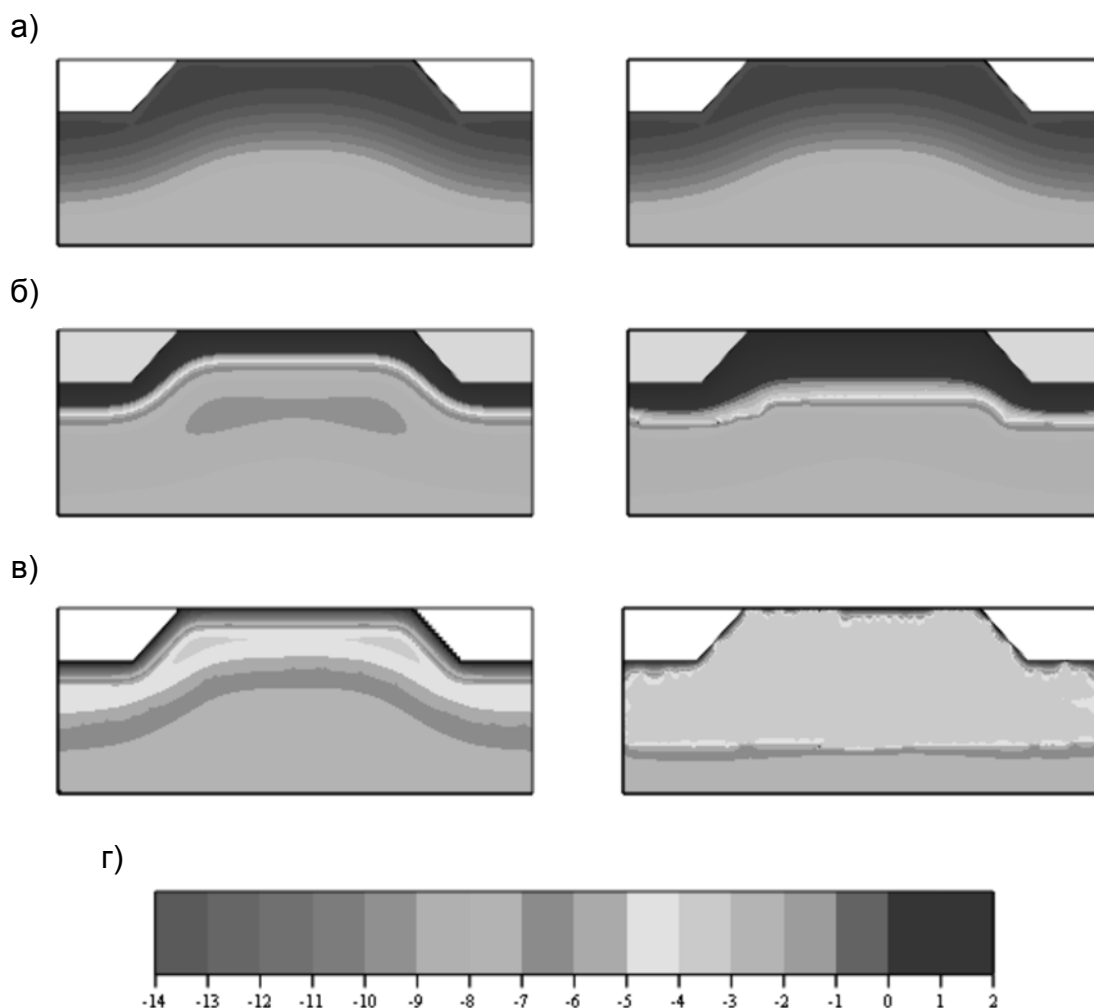


Рис. 3.8. Расходимость вычислительного процесса при несовместимости параметров моделирования (слева:  $\Delta t = 300$  с,  $\Delta x = 15$  см; справа:  $\Delta t = 900$  с,  $\Delta x = 10$  см), при продолжительности моделирования: а) – 100 дней, б) – 200 дней, в) – 310 дней; г) – температурная шкала

Выбор совместимых параметров моделирования является необходимым условием для получения достоверных результатов. Исходя из результатов анализа по тестовым моделям, можно признать наиболее целесообразным сочетание  $\Delta t = 600$  с и  $\Delta x = 10$  см. Также важным вопросом является скорость сходимости результатов к постоянным значениям (для конкретного дня среднестатистического года). На рисунке 3.9 можно видеть, что уже к концу первого года влияние начального состояния грунтового массива становится незначимым.

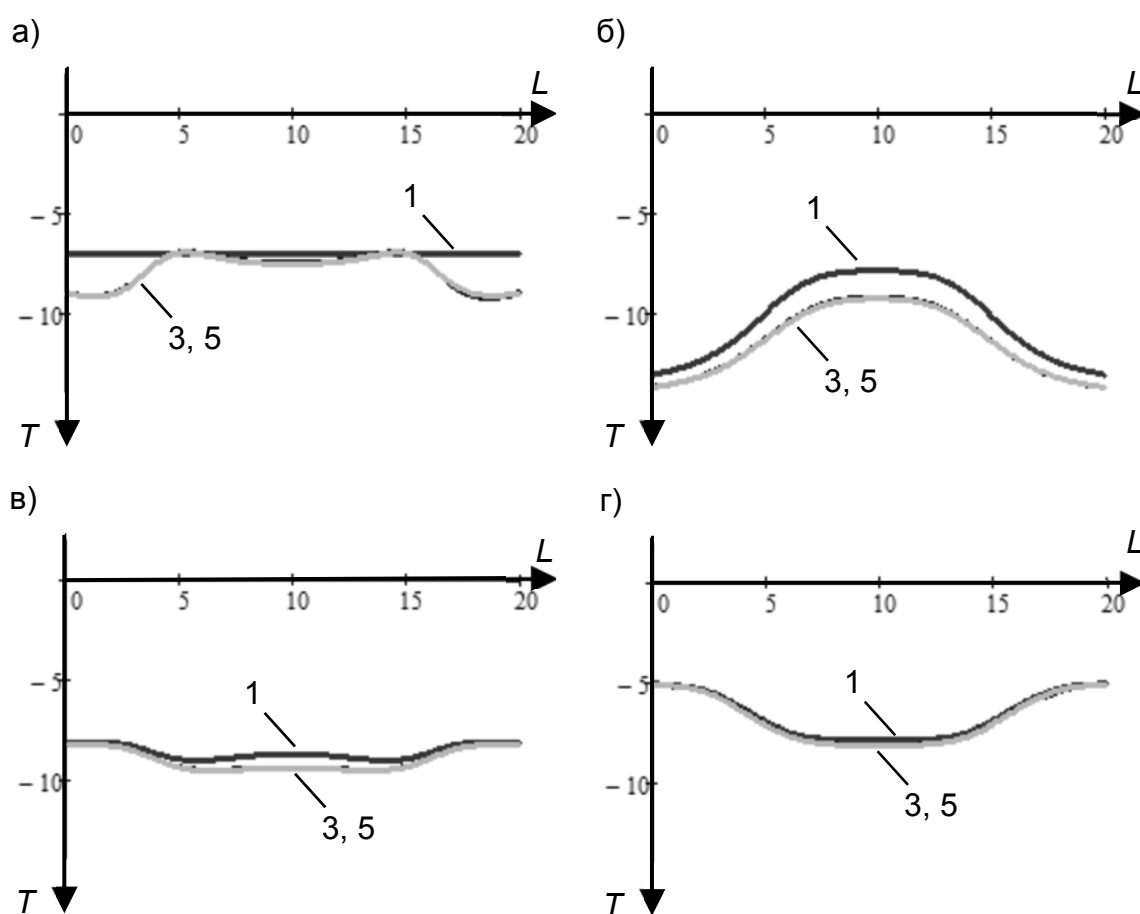


Рис. 3.9. Оценка скорости сходимости вычислительного процесса (на примере горизонтального температурного профиля,  $H = 2$  м): а) – 10 дней, б) – 100 дней, в) – 200 дней, г) – 300 дней; цифрами показан год моделирования

Соответственно, для оценки температуры можно использовать результаты моделирования для второго подряд среднестатистического года; увеличение периода моделирования является нецелесообразным, так как не приводит к повышению точности.

На рисунке 3.10 показано влияние СОУ, которые способствуют более глубокому промерзанию грунта в зимний период и последующему сохранению в летний период «подушки холода» (рис. 3.10 в, г).

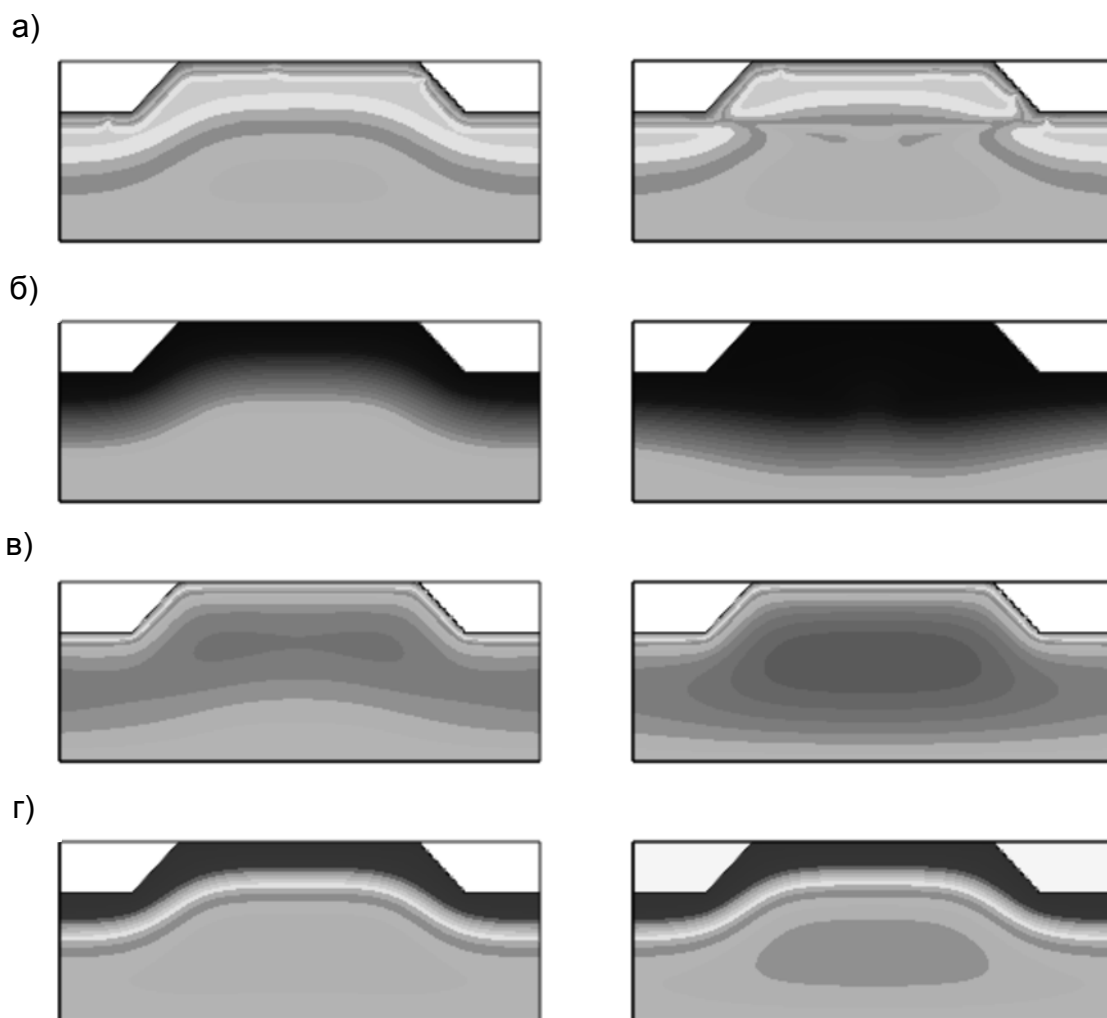


Рис. 3.10. Температурный режим грунта без СОУ (слева) и при их наличии (справа), по состоянию на день среднестатистического года: а) – 300, б) – 50, в) – 200, г) – 250; температурную шкалу см. рис. 3.8

Таким образом, на основании результатов тестового моделирования можно сделать вывод как о работоспособности алгоритмов моделирования температурного режима грунта, так и о корректности их программной реализации.

## Глава 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКОВ СНИЖЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ

### 4.1. Принятые сценарии климатических изменений и модели риска

При прогнозировании климатических рисков на территории криолитозоны России были рассмотрены три варианта климатических изменений.

*Повышение контрастности климата* (модель C02). При этом варианте все среднемесячные температуры  $T > 0$  °C увеличивались на  $\tau_T^+ = +2$  °C, а отрицательные температуры корректировались на величину  $\tau_T^-$  (4.1), исходя из условия неизменности среднегодовой температуры по сравнению с базовым климатом. Таким образом, контрастность температурного режима воздуха на территории проявлялась как более теплое лето и более холодные зимы.

$$\tau_T^- = \tau_T^+ \frac{S^+}{S^-}, \quad (4.1)$$

где  $S^+$  и  $S^-$  – суммы положительных и отрицательных температур по всем соответствующим дням среднестатистического года с базовым климатом (при отсутствии климатических изменений).

*Потепление* (модель C20), при котором все температуры воздуха повышаются на  $\tau_T^+ = +2$  °C, одинаково по всем месяцам года.

*Совместное действие потепления и повышения контрастности климата* (модель C22). При этом варианте климатических изменений температуры воздуха по всем месяцам года сначала увеличивались на  $\tau_T^+ = +2$  °C, после чего определялись  $S^+$  и  $S^-$ . Далее все положительные температуры дополнительно увеличивались еще на  $\tau_T^+ = +2$  °C, а отрицательные корректировались на величину  $\tau_T^-$ , определяемой по (4.1).

При учете вероятностного характера климатических изменений предполагалось, что температура воздуха является случайной величиной  $\tilde{T}$ , распределенной по нормальному закону. При этом  $T = T_0 + \tau_T^+$  считалось средним значением этого распределения ( $T_0$  – температура в условиях базового климата). Вариативность  $\tilde{T}$  определялась исходя из предположения о том, что отклонения от среднего более чем на 2 °С возможны не чаще одного раза в 50 лет, исходя из чего была вычислена дисперсия нормального закона, и далее – вероятности появления отдельных значений температуры.

Оценка рисков на территориально-ориентированном уровне подразумевает отсутствие конкретных данных о виде грунтов в основании объектов транспортной инфраструктуры, а также об их основных физико-механических характеристиках. Соответственно, было выбрано минимально возможное количество независимых грунтовых параметров – вид грунта и его суммарная влажность  $W_{\text{tot}}$ ; остальные характеристики определялись в соответствии с табл. 4.1. Расчет рисков выполнялся для сочетаний грунтовых параметров, лежащих вблизи их граничных значений – песчаного грунта (модели G120 и G135) и глинистого грунта (модели G430 и G450).

Таблица 4.1

Соответствие между основными физико-механическими параметрами грунта и обозначением модели грунта

	Модель грунта			
	G1XX	G2XX	G3XX	G4XX
Вид грунта	песок	супесь	суглинок	глина
$W_{\text{tot}}, \%$	XX	XX	XX	XX
$W_m, \%$	$0,5W_{\text{tot}}$	$0,5W_{\text{tot}}$	$0,5W_{\text{tot}}$	$0,5W_{\text{tot}}$
$i_{\text{tot}}, \%$	$0,1W_{\text{tot}}$	$0,1W_{\text{tot}}$	$0,1W_{\text{tot}}$	$0,1W_{\text{tot}}$
$D_{\text{sal}}, \%$	0	0	0	0
$\rho, \text{кг/м}^3$	1800	1900	1950	2000

Геометрические размеры основания объектов транспортной инфраструктуры, а также формы грунтового массива, принятые при оценке риска на территориально-ориентированном уровне, показаны

в табл. 4.2. Рассматривались грунтовые массивы в форме дорожного профиля и с плоской поверхностью. Глубина массива во всех случаях составляла 10 м, что соответствовало линии затухания годового изменения температур в грунте.

Таблица 4.2

## Геометрические параметры, принятые при оценке риска

		Геометрическая модель			
		L11	L22	L23	L24
Размеры грунтового массива, м (рис. 3.1)	$H_1$	2	0	0	0
	$H$	10	10	10	10
	$L$	10	8	8	8
	$L_1$	4	0	0	0
	$L_2$	8	0	0	0
Размеры области грунта, влияющей на функциональность, м (рис. 1.2)	$X_C$	5	4	4	4
	$L$	2	2	0,4	2
	$H_{\min}$	-2	0	0	2,5
	$H_{\max}$	6	6	6	6
Зависимость для определения критериального показателя		1.2	1.2	1.3	1.4
Объект транспортной инфраструктуры		дорожный профиль	покрытие аэродромов	свайное основание	ленточный фундамент
Виды транспорта, на которых возможно использование объекта	автомобильный	+	—	+	+
	железнодорожный	+	—	+	+
	воздушный	—	+	+	+
	водный	—	—	+	+

Уровень функциональности объекта определялся в соответствии с рис. 1.1, где область пониженной функциональности  $0 < U < 1$  во всех случаях принималась прямолинейной. Величина запаса для рассмотренных геометрических моделей показана в табл. 4.3.

Таким образом, совокупность параметров, использованных при оценке климатических рисков, полностью определяется указанием 4 моделей: климата  $C$ , грунта  $G$ , геометрии  $L$  и запаса  $S$ . Величину риска можно рассматривать как функцию от этих 4 параметров:  $R(C, G, L, S)$ . В дальнейшем описание параметров моделирования будет выполняться в виде  $C1-G450-L23-S1$ , что в данном случае

означает определение риска в условиях повышения контрастности климата, для глинистого грунта суммарной влажностью 50%, в котором расположено свайное основание с коэффициентом запаса несущей способности (в условиях базового климата), равным 1,3.

Таблица 4.3

Величины запаса, принимаемые в рамках модели запаса S1

Критериальный показатель	Геометрическая модель	Запас $\Delta$	
		описание	значение
Осадка оттаявшего грунта	L11, L22	Величина осадки, м	0,1
Несущая способность свайного основания	L23	Коэффициент запаса	1,3
Несущая способность ленточного или столбчатого фундамента	L24	Коэффициент запаса	1,2

Величина негативных последствий  $D$  определялась по (4.2); таким образом,  $D$  была безразмерной величиной. Использование  $D$  в стоимостной форме было невозможно ввиду отсутствия привязанных к объектам экономических показателей, что характерно для территориально-ориентированного уровня оценки климатических рисков. Риск  $R$  представлял собой средневзвешенную, на всем диапазоне возможных климатических изменений, величину негативных последствий  $R = \bar{D}$ , выражаемую в промилле (то есть  $R \in [0; 1000]$ ).

$$D = 1 - U. \quad (4.2)$$

С целью выявления территориально-обусловленных закономерностей для величины климатических рисков был рассмотрен 41 пункт в пределах криолитозоны России, по каждому из которых имеется достоверная характеристика базового состояния климата, построенная по результатам многолетних инструментальных наблюдений. При этом базовое состояние климата не только соответствует



самой точке наблюдений, но и характерно для некоторой территории в ее окрестностях. Территориально близкие пункты, отличающиеся схожими природно-климатическими условиями, объединены в группы. Всего выделено 8 групп (табл. 4.4) – от низкотемпературных районов сплошной вечной мерзлоты до районов с редким островным распространением многолетнемерзлых грунтов и их близкими к 0 °С температурами.

Таблица 4.4

Районирование криолитозоны в зависимости от грунтовых и климатических условий эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры

Тип вечномерзлых грунтов и район криолитозоны		Группа	Пункт	Обозначение
1	2	3	4	5
Низкотемпературная, преимущественно сплошная вечная мерзлота Якутии и Крайнего Севера России	Высокоширотные ( $B > 65^\circ$ ) районы Якутии и Красноярского края	1	Депутатский	DPT
			Саханджа	SHN
			Саскылах	SSK
			Среднеколымск	SRK
			Ессей	ESS
	Магаданская область и восточные ( $L > 145^\circ$ ) территории Якутии	2	Среднекан	SRD
			Усть-Омчуг	USO
			Ягодный	YGD
			Сусуман	SSM
			Дарпир	DRP
	Центральная и западная Якутия	3	Сого-Хая	SGH
			Якутск	YKT
			Югоренок	IYG
			Томмот	TMM
Прерывистая и массивно-островная вечная мерзлота	Восточные районы	4	Нагорный	NGR
			Могоча	MGC
			Чара	CHR
			Комака	KMK
			Нижнеангарск	NZA
			Кежда	KEZ
	Северные районы	5	Ныда	NDA
			Уренгой	URN
			Тазовское	TZV
			Тура	TUR

Окончание табл. 4.4

1	2	3	4	5
Вечная мерзлота островного и редкоостровного характера с близкими к 0 °С температурами затухания сезонных колебаний	Области восточной границы криолитозоны ( $L > 95^\circ$ )	6	Северо-Енисейский	SVE
			Нерчинский Завод	NRZ
			Канск	KNS
			Чемдальск	CHM
			Улан-Удэ	ULU
			Горячинск	GRC
	Области северо-западной границы криолитозоны ( $B > 60^\circ$ )	7	Петрунь	PTR
			Казым	KAZ
			Келлог	KLG
			Саранпауль	SRN
			Толька	TLK
	Кольский полуостров и южное побережье Баренцева моря	8	Варандей	VRN
			Инди́га	IND
			Мурманск	MRM
			Пя́лица	PLZ
			Териберка	TRB
			Терско-Орловский	TRO

В таблице 4.5 показана качественная оценка климатических рисков, которая может изменяться от незначительной до очень высокой, в зависимости от получаемых при моделировании значений  $R$ . Использование качественных уровней упрощает первичную содержательную интерпретацию результатов при принятии управленческих решений по предотвращению и снижению климатических рисков.

Таблица 4.5

## Качественная градация климатических рисков

Описание	Границы риска, промилле	
	от	до
Незначительный	0	100
Низкий	101	300
Средний	301	600
Высокий	601	800
Очень высокий	801	1000

Значения риска  $R$ , соответствующие незначительному риску, свидетельствуют об отсутствии необходимости целенаправленных мероприятий по его устранению. Как правило, низкий уровень риска также не требует специальных действий по своему снижению, хотя в этом случае возможно некоторое снижение функциональности объекта. Средний уровень риска подразумевает планирование мероприятий, противодействующих снижению функциональности, с возможностью их реализации по мере проявления негативных последствий климатических изменений. Высокий, и тем более, очень высокий уровень риска, требуют заблаговременного осуществления деятельности по предотвращению снижения функциональности объекта, не дожидаясь реального проявления последствий климатических изменений.

#### **4.2. Оценка рисков объектам транспортной инфраструктуры при повышении контрастности климата**

Повышение контрастности климата (модель C02) характеризовалось сохранением среднегодовых температур воздуха на уровне базового климата, с возрастанием летних (положительных) температур на  $\tau_T^+ = +2\text{ }^\circ\text{C}$  и соответствующим понижением зимних (отрицательных) температур. Результаты моделирования климатических рисков в условиях первой территориальной группы (табл. 4.4) показаны на рис. 4.1. Для *автодорожного и железнодорожного профиля* риски при грунтах низкой влажности (модели G120 и G430) являются незначительными ( $R \leq 99$ ); с повышением влажности грунта риски несколько возрастают (для моделей G135 и G450 риск  $R \leq 285$ ) до низкого уровня. *Аэродромное покрытие* характеризуется значениями  $R \leq 91$  при низкой влажности грунта и  $R \leq 188$  при высокой; некоторое снижение риска для этого вида объектов объясняется отсутствием боковых поверхностей, по которым осуществляется дополнительный приток тепла в грунт автодорожного и железнодорожного профиля в течение летнего периода.

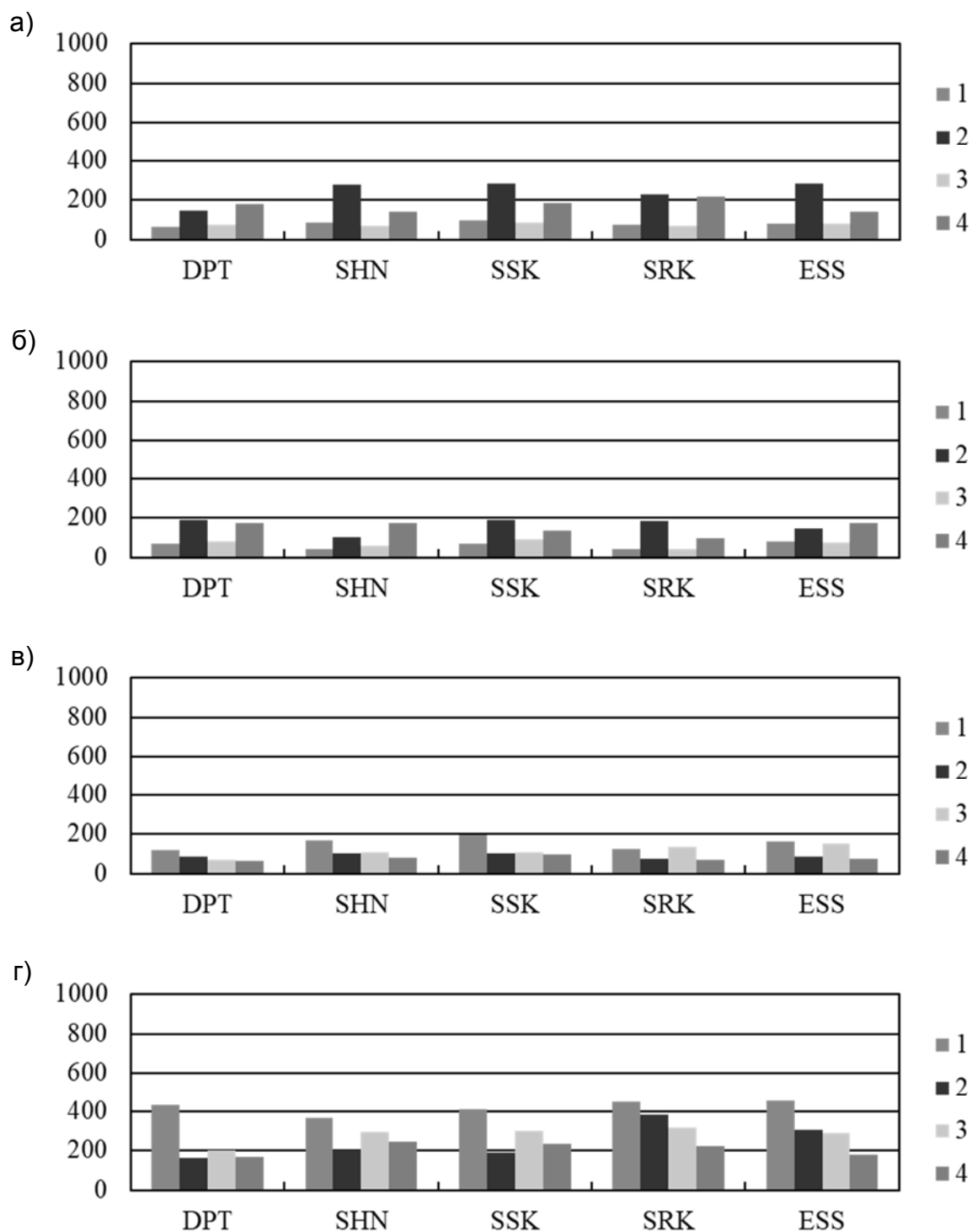


Рис. 4.1. Климатические риски в высокоширотных районах Якутии и Красноярского края (1-я территориальная группа) при повышении контрастности климата: а) – автодорожный и железнодорожный профиль, б) – аэродромное покрытие, в) – свайное основание, г) – ленточный или столбчатый фундамент; модели грунта: 1 – G120, 2 – G135, 3 – G430, 4 – G450

*Свайное основание*, как элемент автомобильных и железнодорожных мостов, отличается небольшим снижением риска при повышении влажности грунта ( $71 \leq R \leq 196$  при низкой влажности и  $70 \leq R \leq 104$  при высокой влажности), риск не выходит за пределы низкого уровня. Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям оказываются *ленточные или столбчатые фундаменты*, для которых минимальное значение риска составляет  $R = 162$ , а максимальное  $R = 457$ ; таким образом, в отдельных случаях (песчаный грунт низкой влажности) прогнозируется средний уровень риска.

Климатические риски для второй территориальной группы показаны на рис. 4.2-4.3. В целом, существенных отличий по сравнению с первой группой не отмечено. *Автомобильный и железнодорожный профили* (рис. 4.2) характеризуются незначительными рисками при грунтах низкой влажности ( $74 \leq R \leq 98$ ) и низкими – при высокой влажности грунта ( $205 \leq R \leq 284$ ). *Аэродромное покрытие* (рис. 4.3а) также отличается несколько меньшими показателями климатических рисков ( $R \leq 94$  при низкой влажности и  $R \leq 250$  – при высокой). *Свайное основание* (рис. 4.3б) при грунтах низкой влажности характеризуется стабильно низким уровнем риска ( $112 \leq R \leq 204$ ), с его возможным снижением до незначительного при высокой влажности грунта ( $47 \leq R \leq 155$ ). Наибольший по всем видам объектов риск (*ленточный или столбчатый фундамент* – рис. 4.3в) в основном соответствует среднему уровню, с однократным случаем его повышения до высокого (в условиях Усть-Омчуга для модели G120 получена оценка риска  $R = 604$ ).

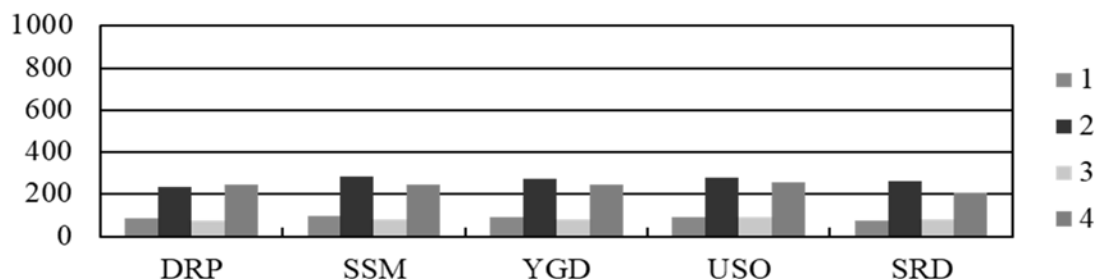


Рис. 4.2. Климатические риски в районах Магаданской области и восточных районах Якутии (2-я территориальная группа) в отношении автодорожного и железнодорожного профилей при повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

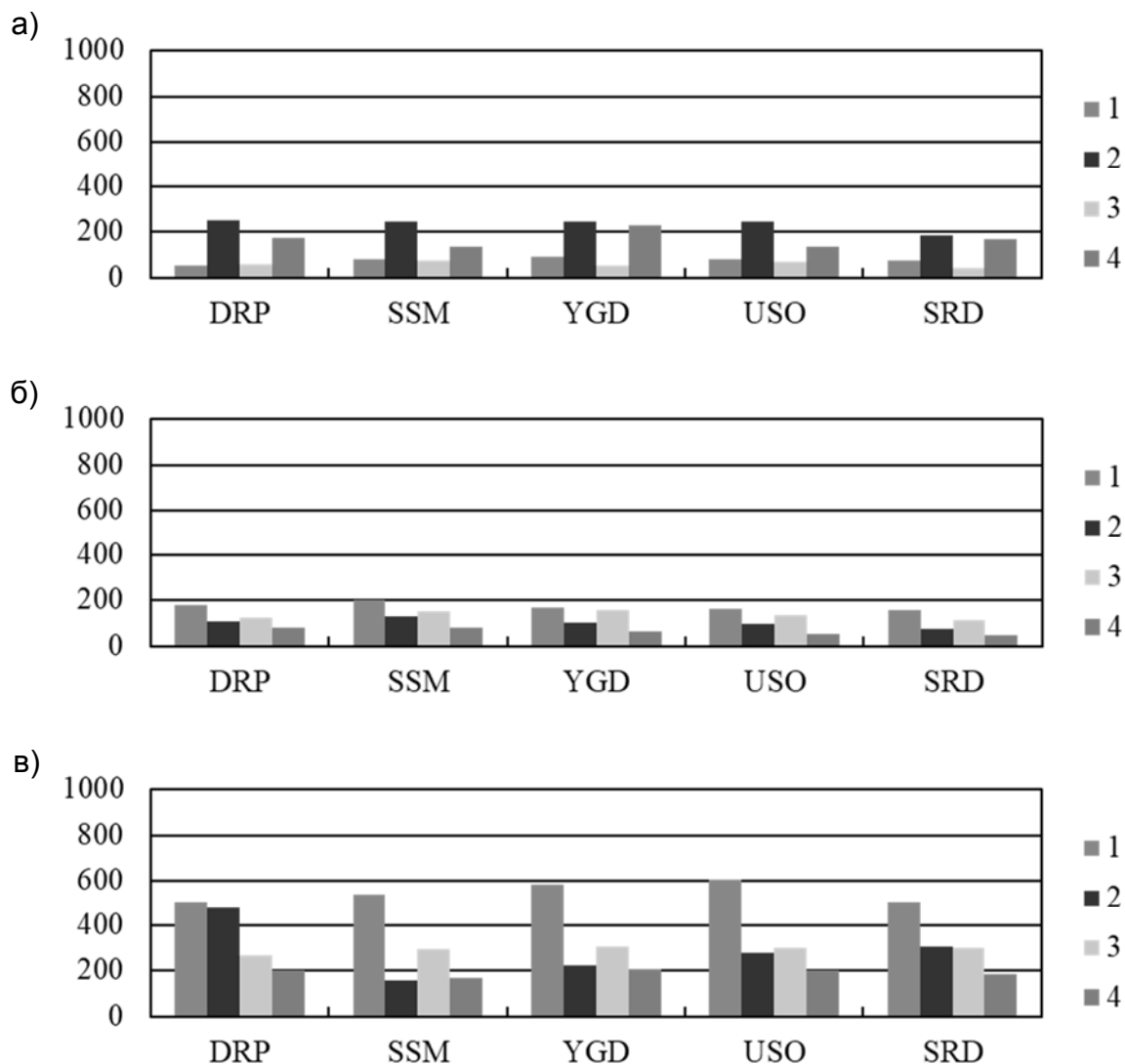


Рис. 4.3. Климатические риски в районах Магаданской области и восточных районах Якутии (2-я территориальная группа) в отношении аэродромного покрытия (а), свайного основания (б) и ленточного или столбчатого фундамента (в) при повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Третья территориальная группа характеризуется рисками, показанными на рис. 4.4, которые несколько меньше, чем у первых двух групп. Автодорожный и железнодорожный профили характеризуются незначительным ( $R \leq 72$ ) или низким ( $R \leq 243$ ) риском – в зависимости от влажности грунта. Прогнозируемый риск в отношении аэродромного покрытия примерно такой же ( $R \leq 81$  и  $R \leq 226$  для двух уровней влажности грунта). Свайное основание подвергается низкому риску ( $R \leq 147$ ) при моделях G120 и G430, и незначительному

( $R \leq 92$ ) при моделях G135 и G450. Риск для *ленточного или столбчатого фундамента* колеблется между низким ( $209 \leq R \leq 271$  для модели G450) и средним ( $311 \leq R \leq 576$  по остальным грунтовым моделям).

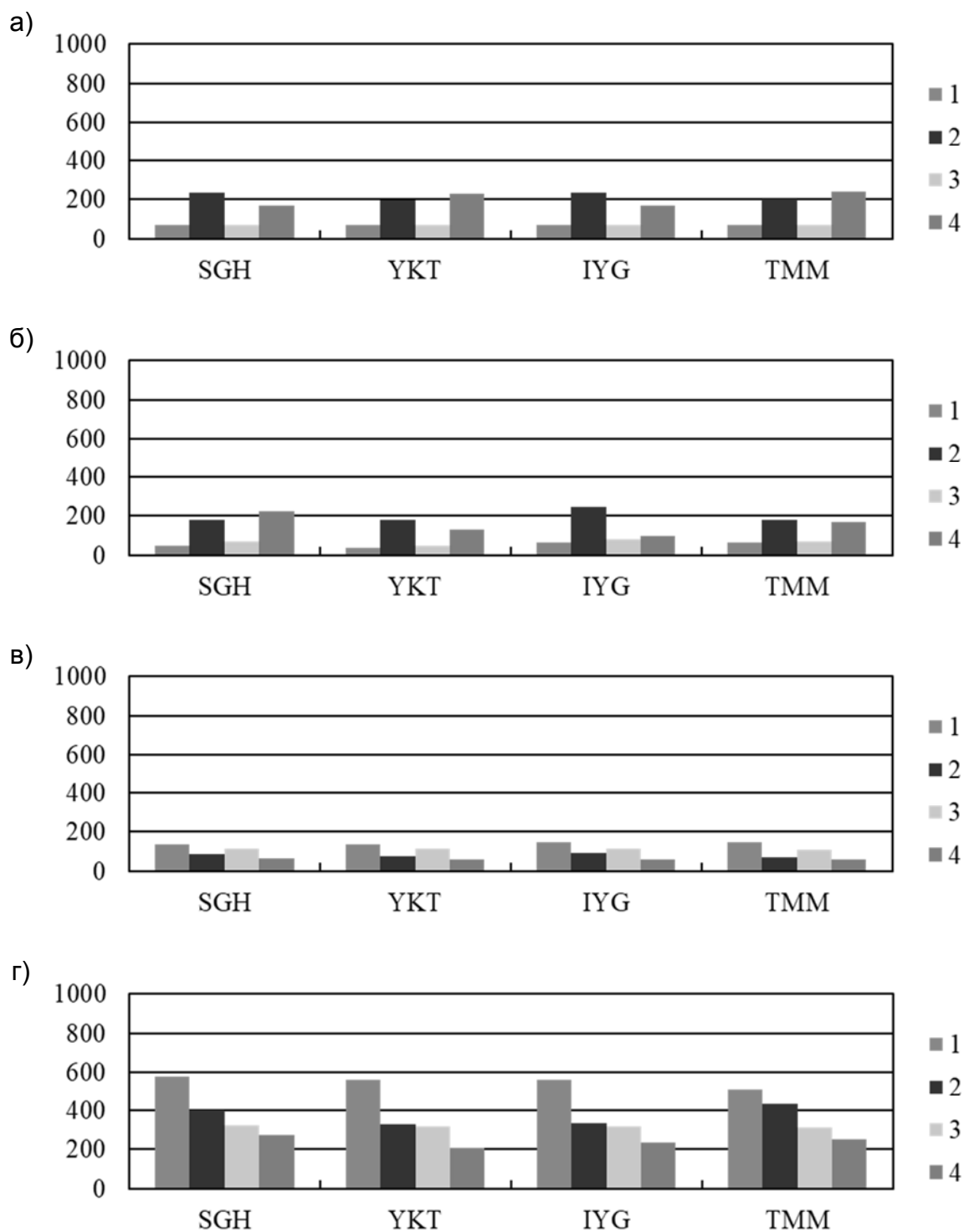


Рис. 4.4. Климатические риски в центральных и западных районах Якутии (3-я территориальная группа) при повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Результаты количественной оценки климатических рисков для четвертой территориальной группы показаны на рис. 4.5.

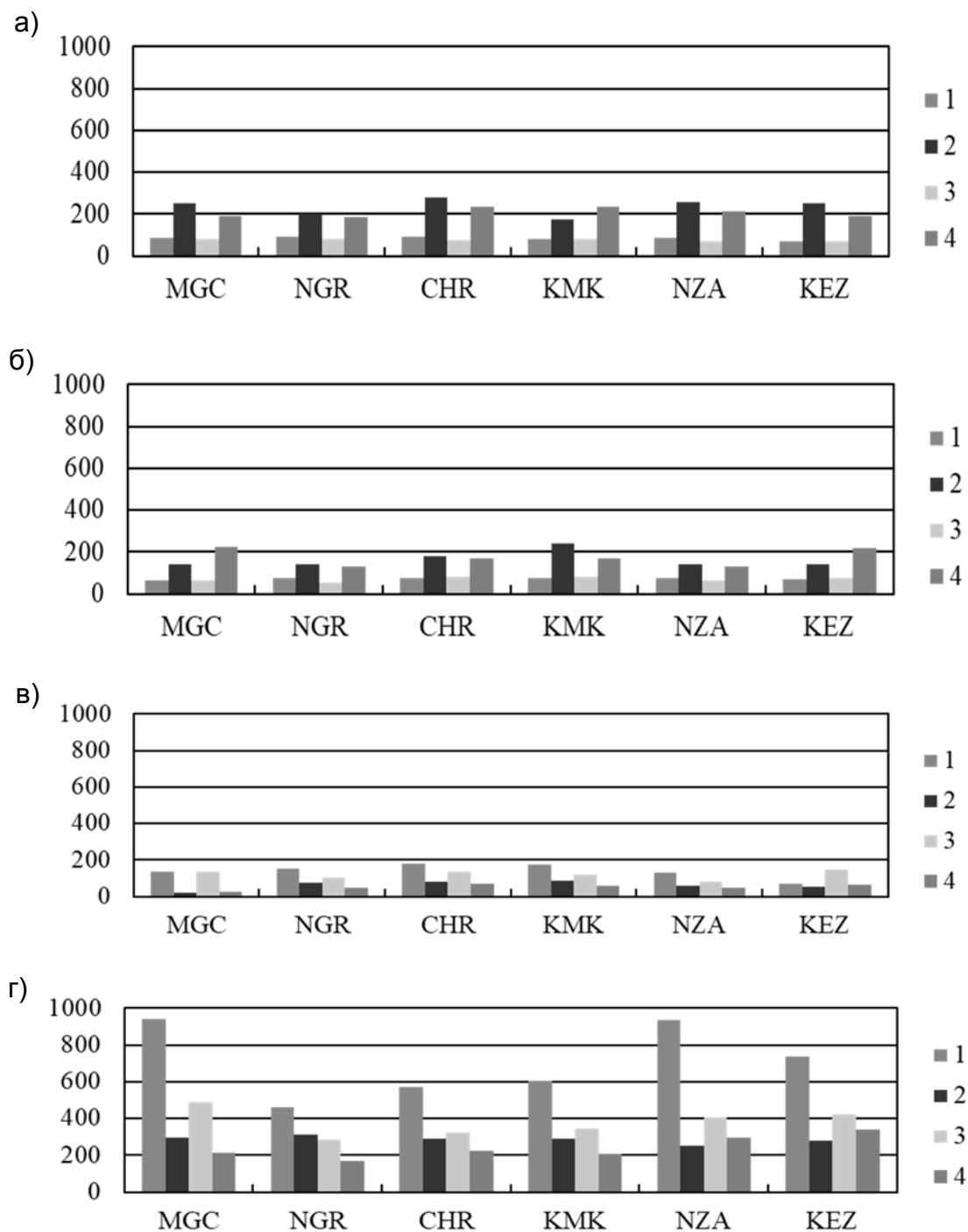


Рис. 4.5. Климатические риски в восточных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (4-я территориальная группа) при повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1



В природно-климатических условиях прерывистой и массивно-островной вечной мерзлоты риски для объектов транспортной инфраструктуры несколько повышаются, но в целом остаются на тех же уровнях. *Автомобильный и железнодорожный профили* при грунтах низкой влажности характеризуются незначительным риском ( $69 \leq R \leq 89$ ), а при высокой влажности – низким риском ( $172 \leq R \leq 277$ ). Аналогичная картина получена и в отношении *аэродромного покрытия* ( $63 \leq R \leq 80$  для моделей G120 и G430 – незначительный риск, и  $129 \leq R \leq 243$  для моделей G135 и G450 – низкий риск). Риски для *свайного основания* также не превышают низкого уровня, причем из всех полученных оценок максимальная  $R = 177$ , а более 50% значений риска  $R \leq 87$ . В то же время существенно возрастают риски в отношении *ленточных или столбчатых фундаментов*: при песчаном грунте низкой влажности в двух случаях риск оценивается как очень высокий ( $R = 939$  и  $R = 935$ ) и еще в двух – как высокий ( $R = 739$  и  $R = 606$ ); в остальных случаях – средний уровень риска. Большая влажность грунта для данного вида объектов является благоприятной; при моделях G135 и G450 климатические риски, как правило, находятся на низком уровне (одно значение  $R = 312$  и все остальные  $167 \leq R \leq 296$ ).

Риски для пятой территориальной группы показаны на рис. 4.6. *Автомобильный и железнодорожный профили* характеризуются незначительным риском при низкой влажности грунта ( $R \leq 92$ ), с повышением риска до низкого уровня с ростом влажности ( $R \leq 281$ ). От незначительного до низкого также колеблется риск в отношении *аэродромного покрытия* ( $39 \leq R \leq 287$ ) и *свайного основания* ( $36 \leq R \leq 161$ ). Для *ленточного или столбчатого фундамента* величина риска при низкой влажности грунта лежит в диапазоне  $267 \leq R \leq 539$  (5 значений соответствуют среднему уровню риска, и 3 значения – низкому); при высокой влажности получено одно значение  $R = 315$  (средний уровень) и все остальные оценки соответствуют низкому уровню риска.

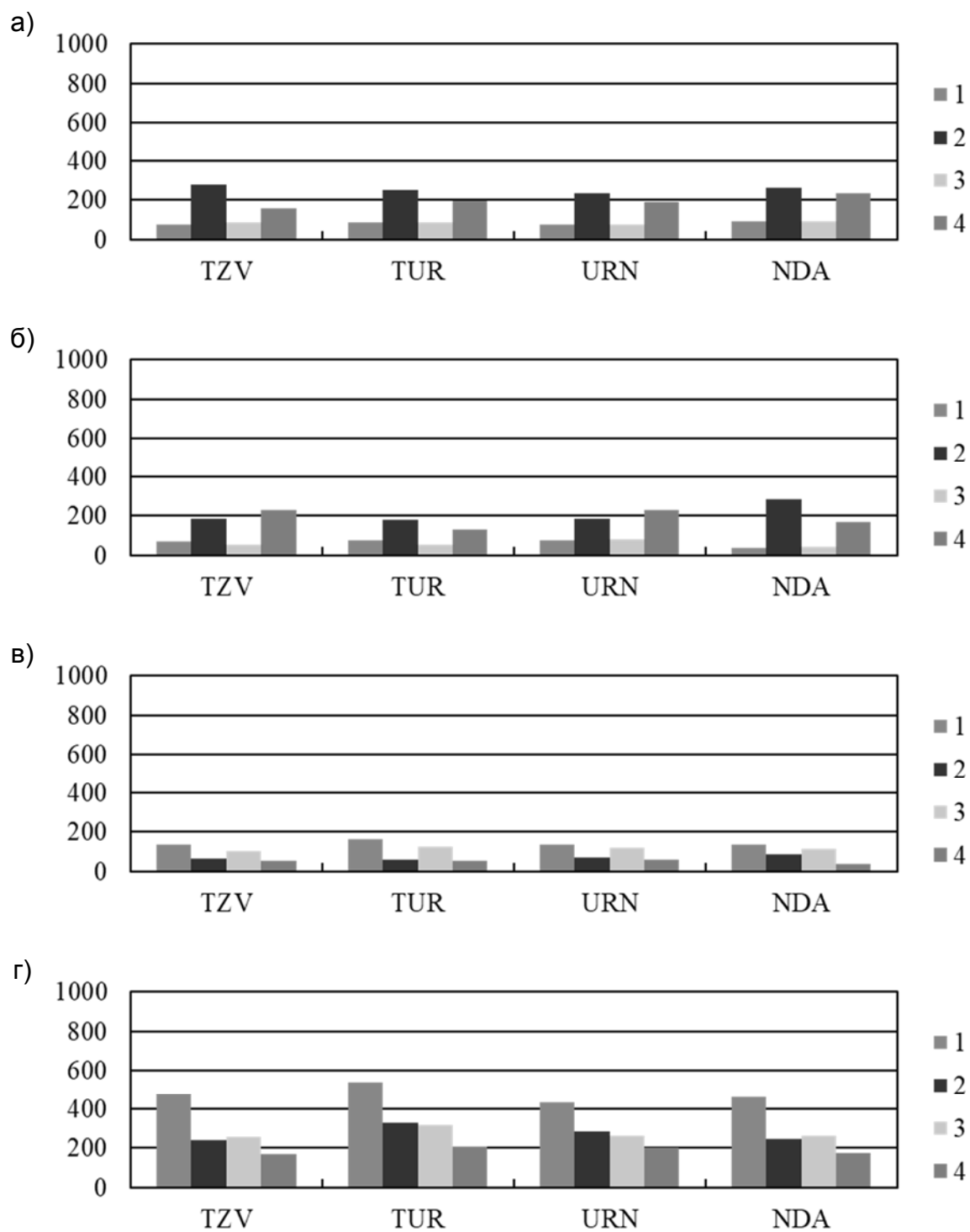


Рис. 4.6. Климатические риски в северных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (5-я территориальная группа) при повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Шестая территориальная группа, как и две остальных, соответствует высокотемпературной вечной мерзлоте; количественные оценки климатических рисков показаны на рис. 4.7.

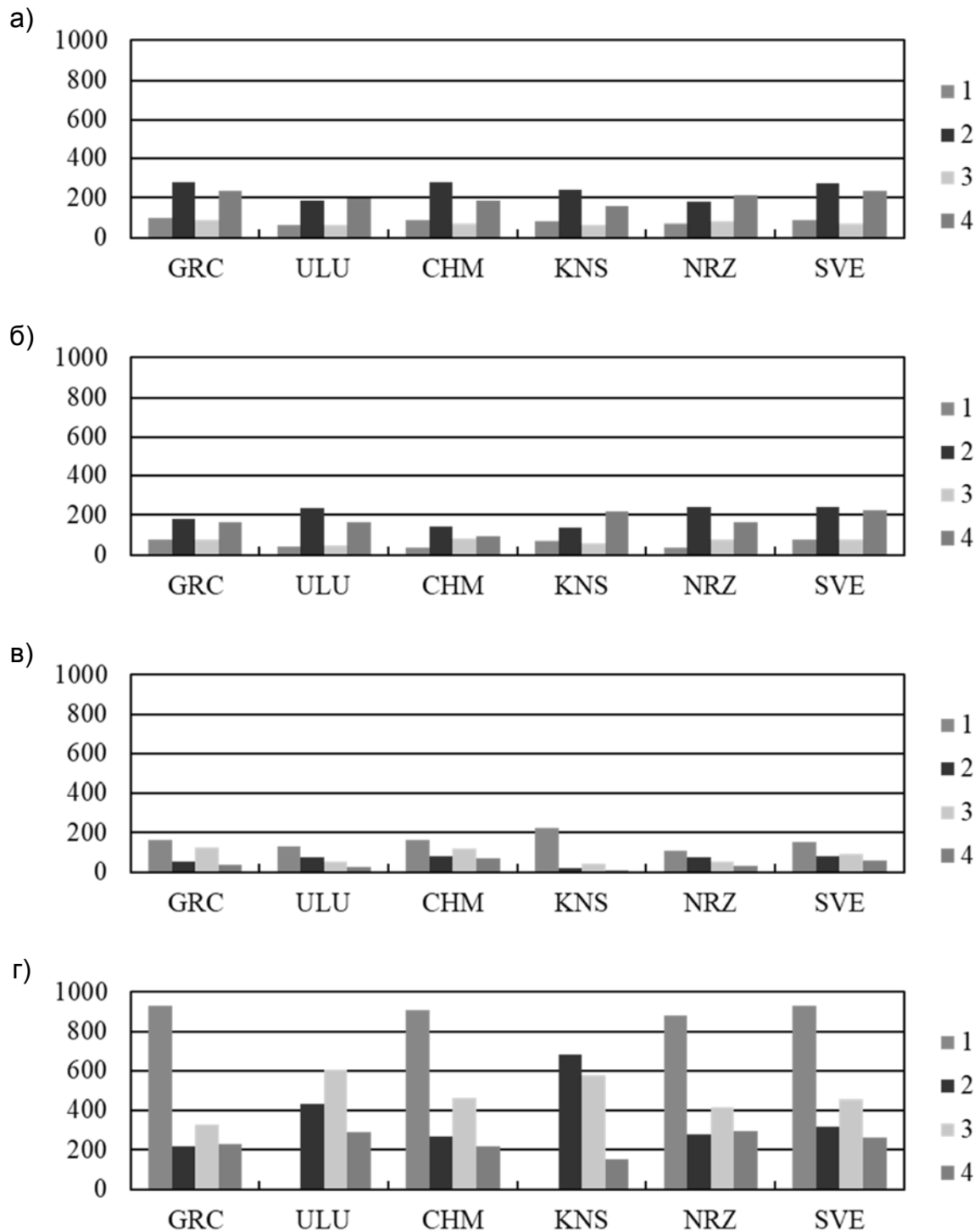


Рис. 4.7. Климатические риски в районах восточной границы криолитозоны (6-я территориальная группа) при повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Риск для *автомобильного и железнодорожного профилей* – незначительный ( $63 \leq R \leq 96$  при моделях G120 и G430) или низкий ( $158 \leq R \leq 280$  при моделях G135 и G450). Такая же картина получена и для *аэродромного покрытия*:  $35 \leq R \leq 78$  при моделях G120 и G430 – незначительный риск, и  $94 \leq R \leq 241$  при моделях G135 и G450 – преимущественно низкий риск. Риски в отношении *свайного основания* также не превышают низкого уровня ( $6 \leq R \leq 226$ ), причем в 5 случаях величина риска  $R < 40$ . Для *ленточного или столбчатого фундамента* весьма опасными являются сухие песчаные грунты (модель G120), при наличии которых риск становится очень высоким ( $882 \leq R \leq 931$ ). Для остальных грунтовых моделей получено два значения  $R = 684$  и  $R = 607$  (высокий риск), семь значений  $315 \leq R \leq 577$  (средний риск) и восемь значений, соответствующих низкому риску (в основном для модели G450).

Климатические риски для седьмой территориальной группы приведены на рис. 4.8-4.9. *Автомобильный и железнодорожный профили* (рис. 4.8) *аэродромное покрытие* (рис. 4.9а) и *свайное основание* (рис. 4.9б) характеризуются уровнями риска, не выше низкого ( $R \leq 277$ ,  $R \leq 284$  и  $R \leq 160$  соответственно; для аэродромного покрытия получено одно значение риска на среднем уровне  $R = 431$ ). Сухие пески также представляют повышенную опасность для *ленточного или столбчатого фундамента* (рис. 4.9в): при модели G120 риск преимущественно очень высокий (4 значения  $879 \leq R \leq 937$ ) либо высокий (1 значение  $R = 616$ ). При остальных рассмотренных грунтовых условиях песчаный грунт (модель G135) обуславливает средний риск ( $353 \leq R \leq 504$ ), а глинистый – как правило, низкий уровень риска.

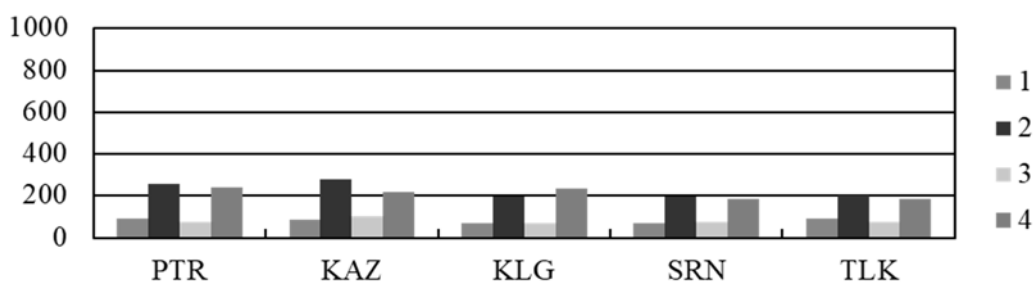


Рис. 4.8. Климатические риски в районах 7-й территориальной группы в отношении автомобильного и железнодорожного профиля при повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

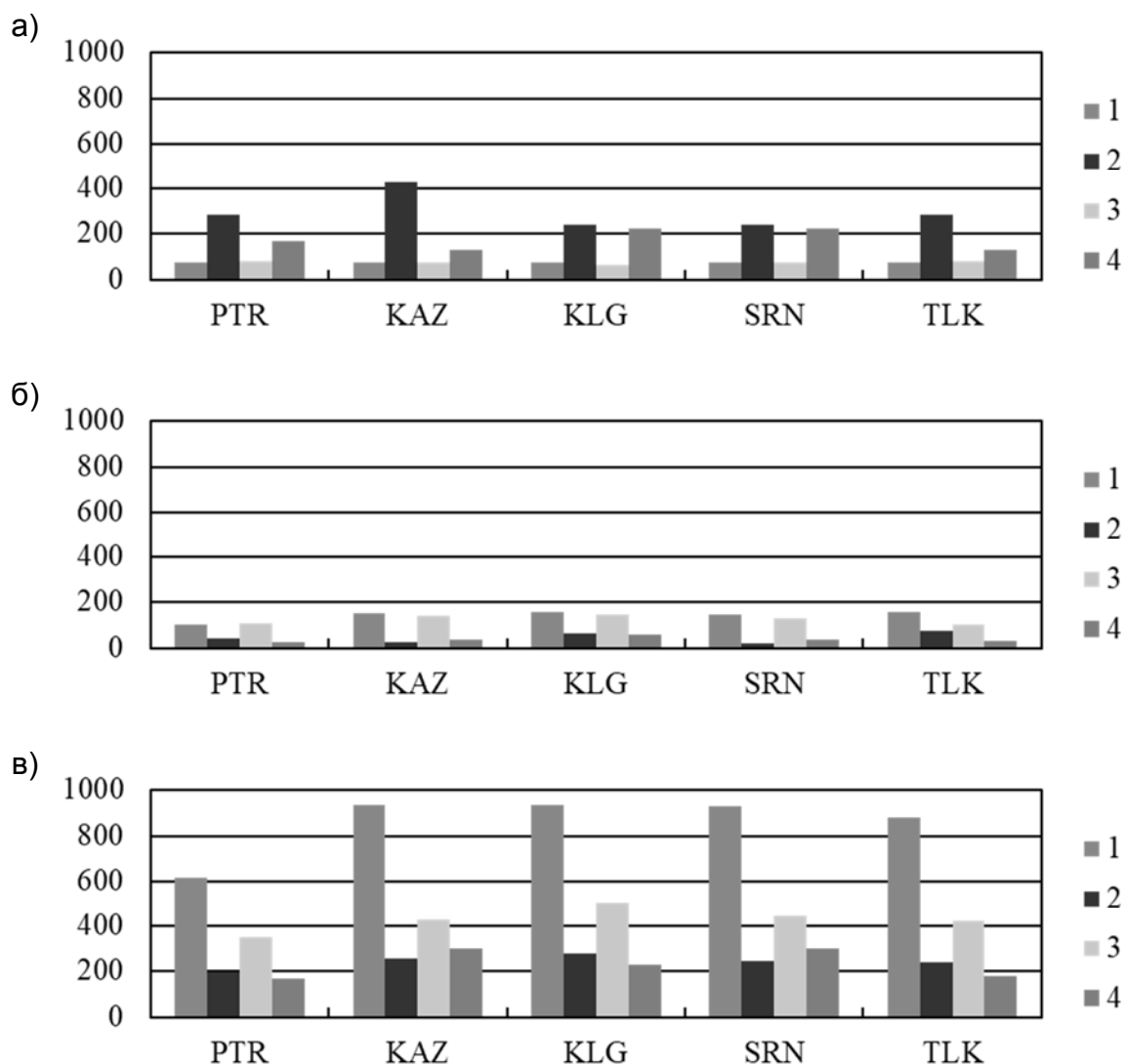


Рис. 4.9. Климатические риски в районах северо-западной границы криолитозоны (7-я территориальная группа) в отношении аэродромного покрытия (а), свайного основания (б) и ленточного или столбчатого фундамента (в) при повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Результаты прогнозирования климатических рисков для восьмой территориальной группы показаны на рис. 4.10; эта группа отличается большой вариативностью полученных результатов в зависимости от климатических и грунтовых условий. *Автомобильный и железнодорожный профили* в наибольшей степени характеризуются низким уровнем риска (15 значений  $101 \leq R \leq 284$ ), при наличии отдельных как незначительных (4 значения  $83 \leq R \leq 96$ ), так и средних (5 значений  $316 \leq R \leq 391$ ) уровней риска. Для *аэродромного покрытия* оценок риска, превышающих низкий уровень, не получено

( $51 \leq R \leq 284$ ). Риски в отношении *свайного основания* при высокой влажности грунта прогнозируются близкими к нулевым (6 значений  $R = 0$  и 6 значений  $R \leq 35$ ). Грунты с малой влажностью увеличивают риск незначительно ( $R \leq 206$ ).

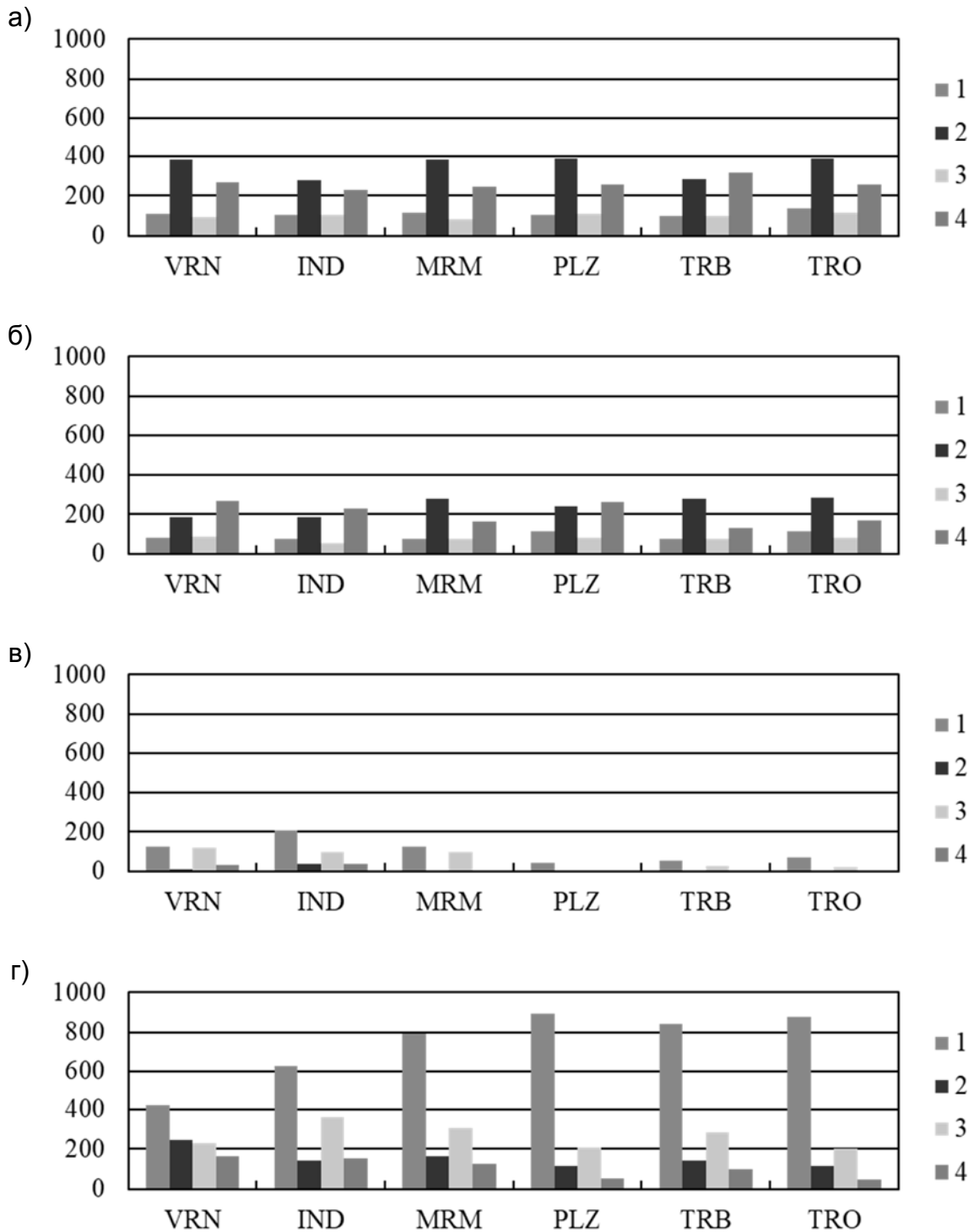


Рис. 4.10. Климатические риски в районах Кольского полуострова и южного побережья Баренцева моря (8-я территориальная группа) при повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

В условиях сухих песков *ленточные или столбчатые фундаменты* могут характеризоваться, в зависимости от климатических условий, средним ( $R = 422$ ), высоким ( $624 \leq R \leq 793$ ) или очень высоким ( $841 \leq R \leq 891$ ) уровнями риска. При этом риск очень быстро снижается при увеличении влагонасыщенности грунта или по мере его перехода от песчаного к глинистому: при грунтовых моделях, отличных от G120, получено только 2 значения ( $R = 359$  и  $R = 306$ ), соответствующих среднему уровню риска, все остальные значения получены на низком и незначительном уровнях.

В целом необходимо отметить, что повышение контрастности климата на величину до  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  не вызывает серьезных рисков в отношении объектов транспортной инфраструктуры. Риски для *автомобильного и железнодорожного профилей, аэродромных покрытий и свайных оснований мостов* и иных транспортных сооружений, как правило, находятся на низком или даже незначительном уровнях по всей территории криолитозоны. Значительные риски, вплоть до очень высоких, прогнозируются только для относительно мало заглубленных *ленточных или столбчатых фундаментов*, в первую очередь расположенных в районах высокотемпературной мерзлоты.

#### **4.3. Оценка рисков объектам транспортной инфраструктуры при повышении среднегодовой температуры воздуха**

Потепление климата (модель C20) характеризовалось равномерным (для всех месяцев среднестатистического года) повышением температуры воздуха на  $\tau_T^+ = +2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты моделирования климатических рисков в условиях первой территориальной группы показаны на рис. 4.11. Для *автодорожного и железнодорожного профилей* риски при грунтах низкой влажности (модели G120 и G430) лежат в диапазоне  $86 \leq R \leq 114$ , что позволяет считать их в целом незначительными. С повышением влажности грунта риски возрастают (для моделей G135 и G450 риск  $216 \leq R \leq 289$ ), но остаются низкими.

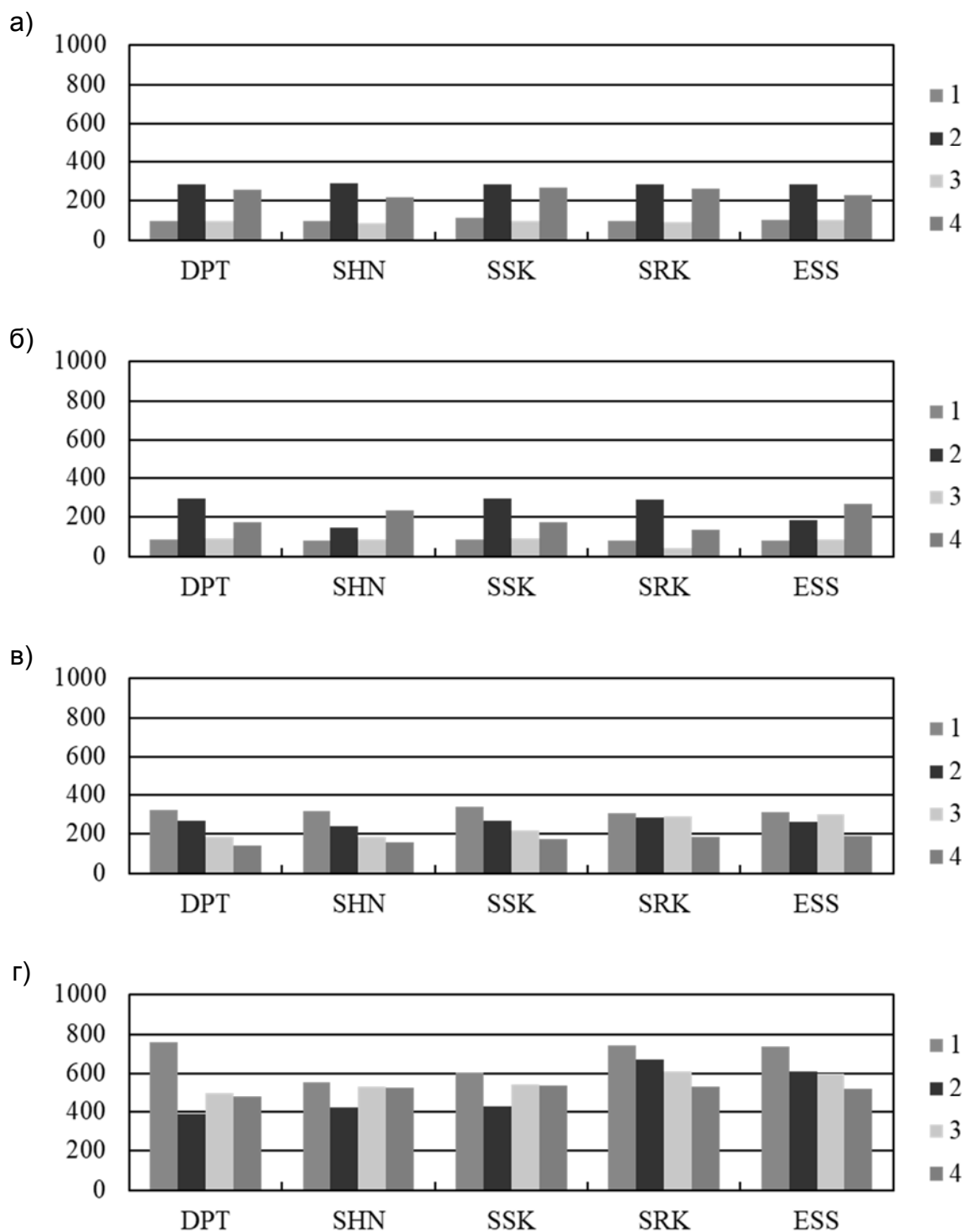


Рис. 4.11. Климатические риски в высокоширотных районах Якутии и Красноярского края (1-я территориальная группа) при потеплении климата: типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Аналогичными оценками риска характеризуется и *аэродромное покрытие* ( $43 \leq R \leq 91$  при низкой влажности грунта и  $135 \leq R \leq 293$  при высокой). *Свайное основание* отличается небольшим снижением



риска при повышении влажности грунта ( $185 \leq R \leq 341$  при низкой влажности, что в отдельных случаях повышает климатические риски до среднего уровня, и  $143 \leq R \leq 282$  при высокой влажности, где риск остается на низком уровне). Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям остаются *ленточные или столбчатые фундаменты*, для которых минимальное значение риска составляет  $R = 389$ , а максимальное  $R = 761$ ; из 20 значений в этой территориальной группе 13 соответствуют среднему, а 7 – высокому уровню риска.

На рисунке 4.12 показаны прогнозируемые оценки риска для второй территориальной группы. *Автомобильный и железнодорожный профили* характеризуются преимущественно низким уровнем риска ( $102 \leq R \leq 287$ ), при двух полученных значениях риска, соответствующих незначительному уровню ( $R = 92$  и  $R = 93$ ) и одном значении ( $R = 312$ ) – среднему уровню. Количественные оценки риска для *аэродромного покрытия* несколько ниже, примерно в равном количестве отражающие незначительный и низкий уровни риска (максимальное значение  $R = 291$ ).

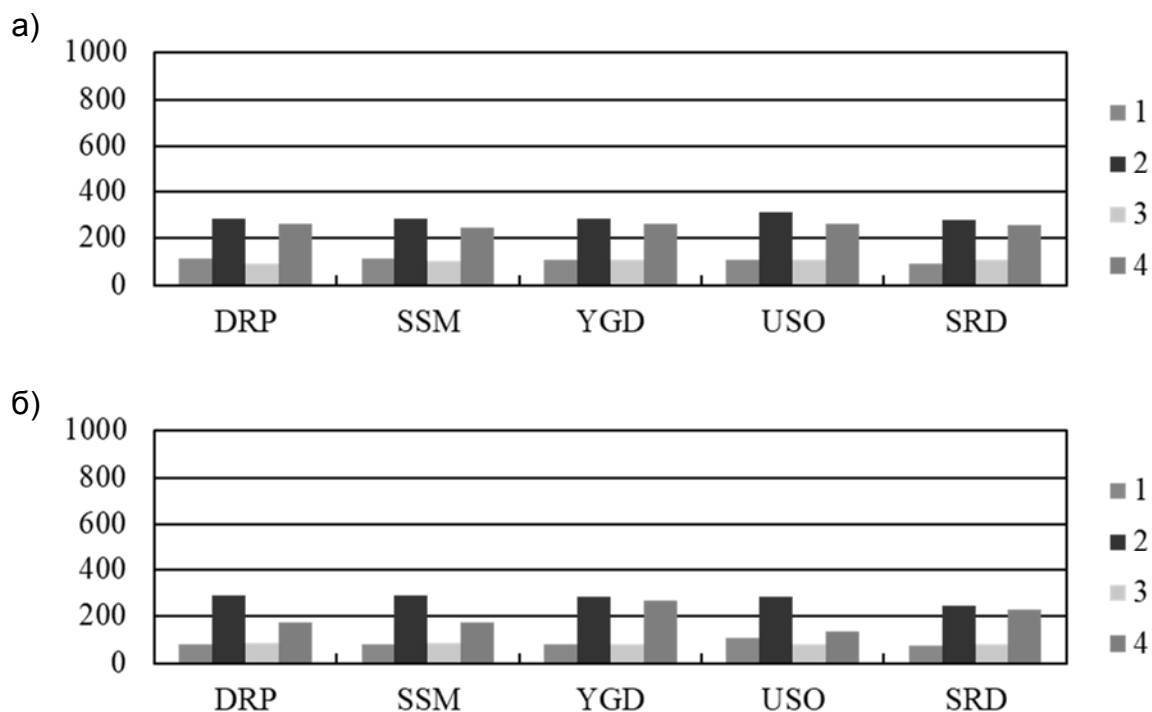


Рис. 4.12. Климатические риски в районах Магаданской области и восточных районах Якутии (2-я территориальная группа) в отношении автомобильного и железнодорожного профиля (а) и аэродромного покрытия (б) при потеплении климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

В отношении *свайных оснований* (рис. 4.13а) при низкой влажности грунта прогнозируется, как правило, средний уровень риска (8 значений  $305 \leq R \leq 364$ ), низкому уровню соответствуют 2 значения ( $R = 271$  и  $R = 294$ ). Высокая влажность грунта снижает риск до низкого уровня (7 значений  $232 \leq R \leq 289$ ), максимальное значение  $R = 322$ . Весьма значительные риски ожидаются для *ленточных или столбчатых фундаментов* (рис. 4.13б): в сухих песках на высоком уровне риска ( $727 \leq R \leq 783$ ), в иных грунтах – преимущественно на среднем уровне ( $397 \leq R \leq 579$ ) при трех значениях риска на высоком уровне  $650 \leq R \leq 718$ .

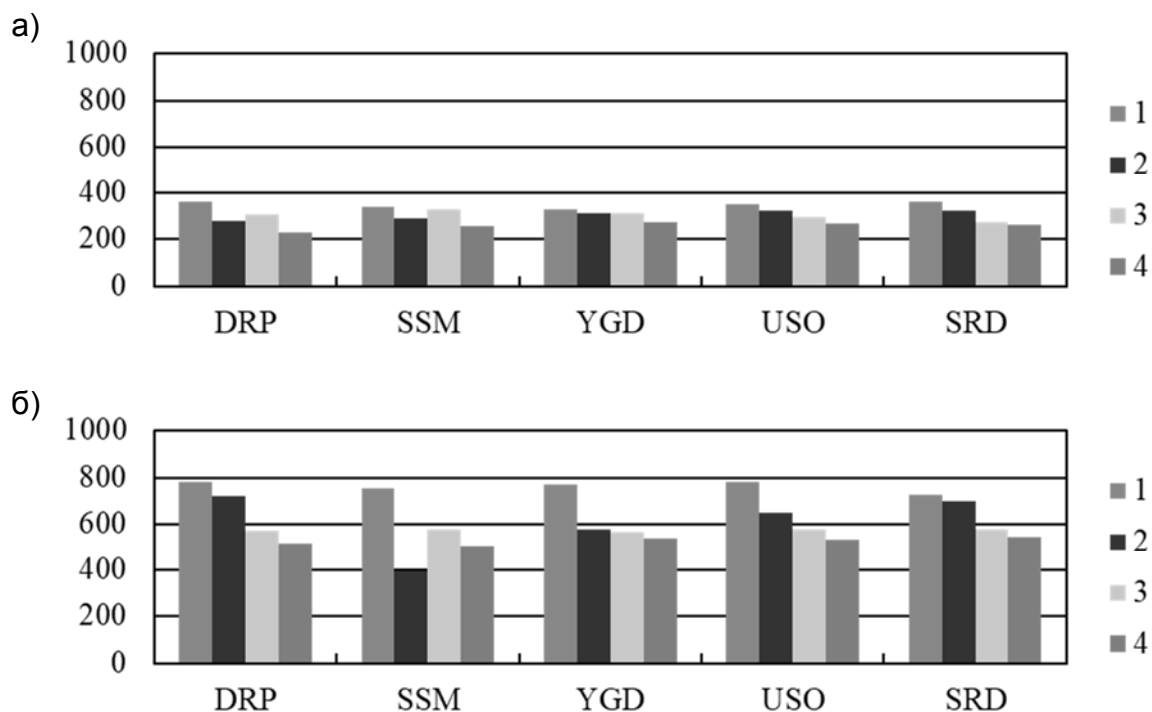


Рис. 4.13. Климатические риски в районах Магаданской области и восточных районах Якутии (2-я территориальная группа) в отношении свайных оснований (а) и ленточных или столбчатых фундаментов (б) при потеплении климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Климатические риски для третьей территориальной группы приведены на рис. 4.14. Типичный уровень риска для *автомобильного и железнодорожного профилей* – низкий ( $101 \leq R \leq 286$ ), при двух значениях  $R = 93$  и  $R = 319$ , формально выходящих за границы этого уровня, но весьма близких к нему. *Аэродромное покрытие* стабильно характеризуется незначимым риском при низкой влажности грунта (все

полученные значения  $74 \leq R \leq 81$ ), и низким риском ( $132 \leq R \leq 282$ ) – при высокой. *Свайное основание* при грунтовых моделях G120 и G430 находится на среднем уровне риска ( $306 \leq R \leq 377$ ), а при моделях G135 и G 450 – на низком ( $243 \leq R \leq 275$  при одном значении  $R = 325$ ).

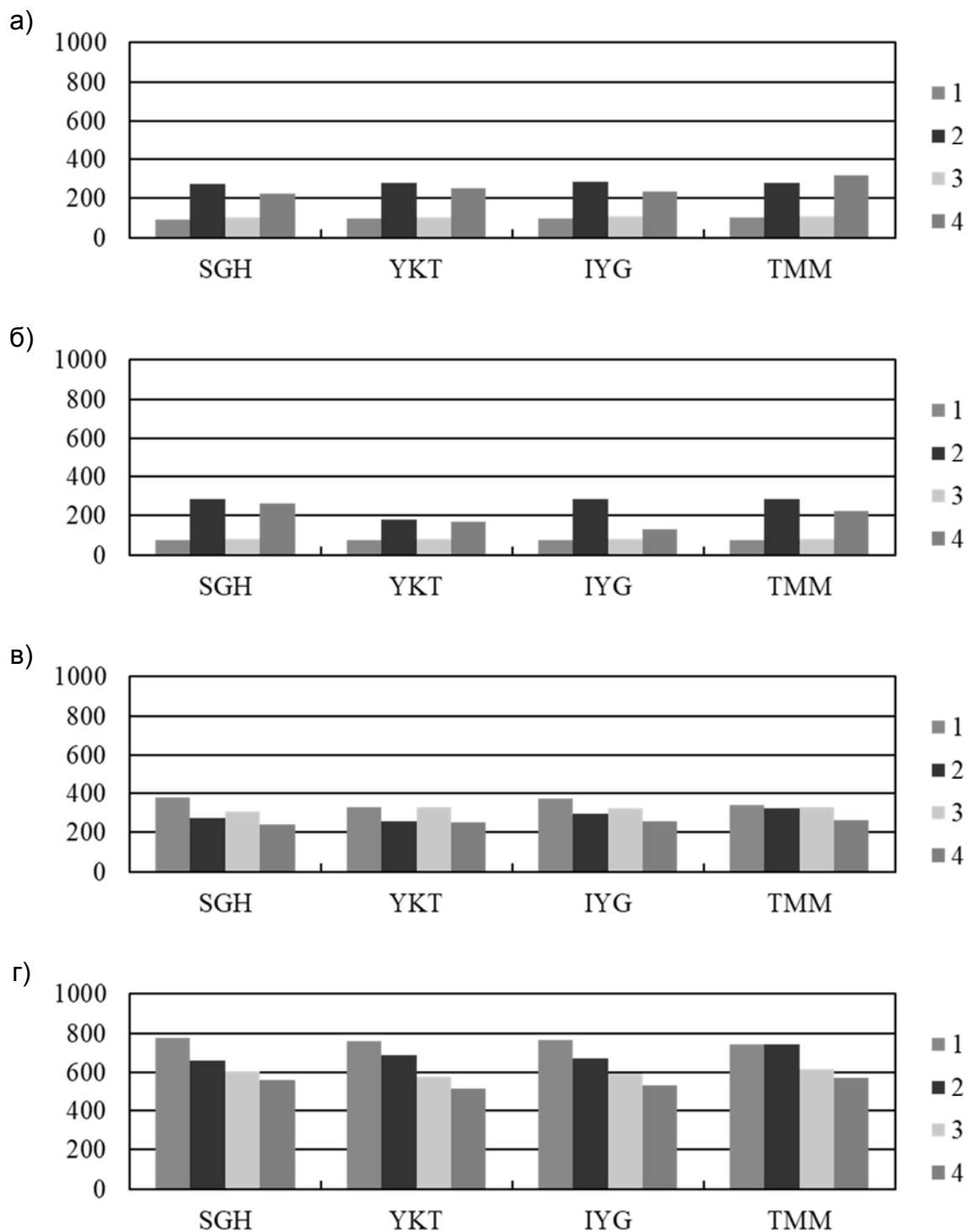


Рис. 4.14. Климатические риски в центральных и западных районах Якутии (3-я территориальная группа) при потеплении климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Уровень риска для *ленточного или столбчатого фундамента* зависит в большей степени от вида грунта – в песчаном грунте риск высокий ( $662 \leq R \leq 773$ ), в глинистом – средний ( $515 \leq R \leq 592$  при двух значениях  $R = 607$  и  $R = 613$ ).

Количественные оценки климатических рисков для четвертой территориальной группы показаны на рис. 4.15. Для *автодорожного и железнодорожного профилей* (рис. 4.15а) только одно значение  $R = 95$  находится на верхней границе незначительного уровня, в основном этот вид объектов характеризуется низким ( $17$  значений  $105 \leq R \leq 283$ ) и средним ( $6$  значений  $302 \leq R \leq 387$ ) уровнями риска. Для *аэродромного покрытия* (рис. 4.15б) при грунтах низкой влажности прогнозируется незначительный риск ( $75 \leq R \leq 99$  при двух значениях  $R = 112$  и  $R = 118$ ), при высокой влажности – низкий риск ( $139 \leq R \leq 282$ ).

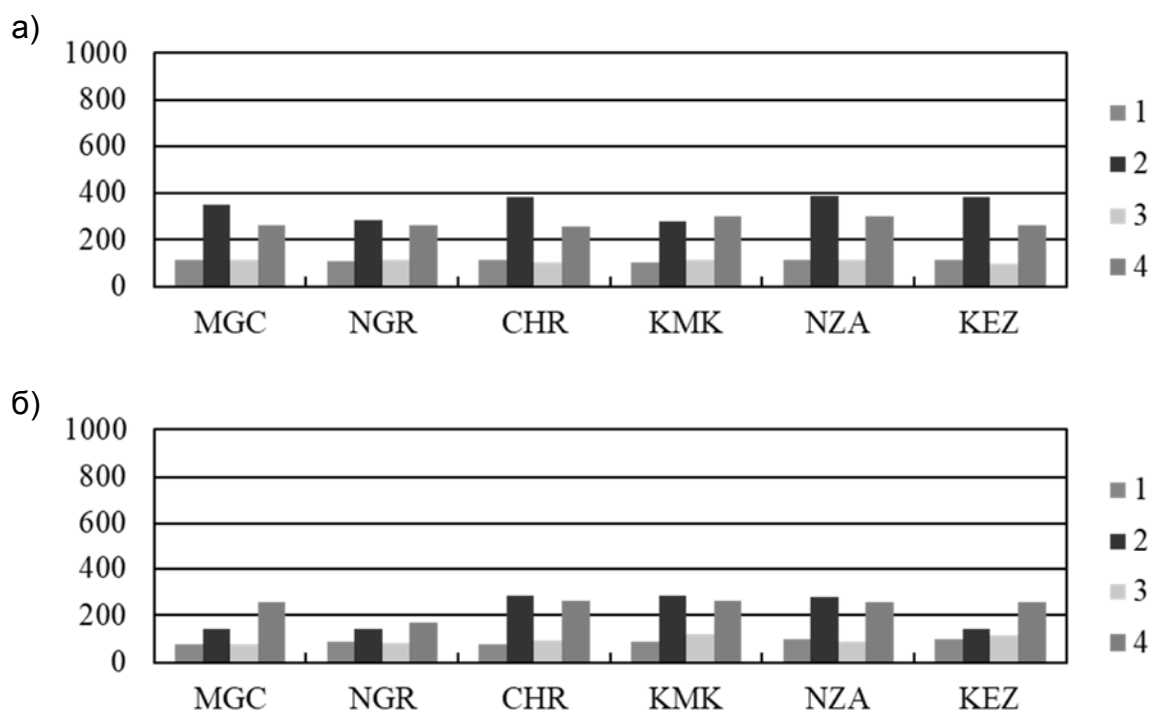


Рис. 4.15. Климатические риски в восточных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (4-я территориальная группа) в отношении автодорожного и железнодорожного профиля (а) и аэродромного покрытия (б) при потеплении климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Средний риск ( $309 \leq R \leq 463$ ) характерен для *свайного основания*; (рис. 4.16а); для модели G450 получены три близких к этому

уровню значения  $291 \leq R \leq 294$ . В отношении *ленточного или столбчатого фундамента* (рис. 4.16б) получены 2 максимально возможных значения риска  $R = 1000$  и еще 4 значения  $819 \leq R \leq 886$ , отражающих очень высокий риск. Высокий уровень риска является преобладающим (12 значений  $611 \leq R \leq 747$ ), средний уровень  $495 \leq R \leq 573$  зафиксирован для остальных 6 значений.

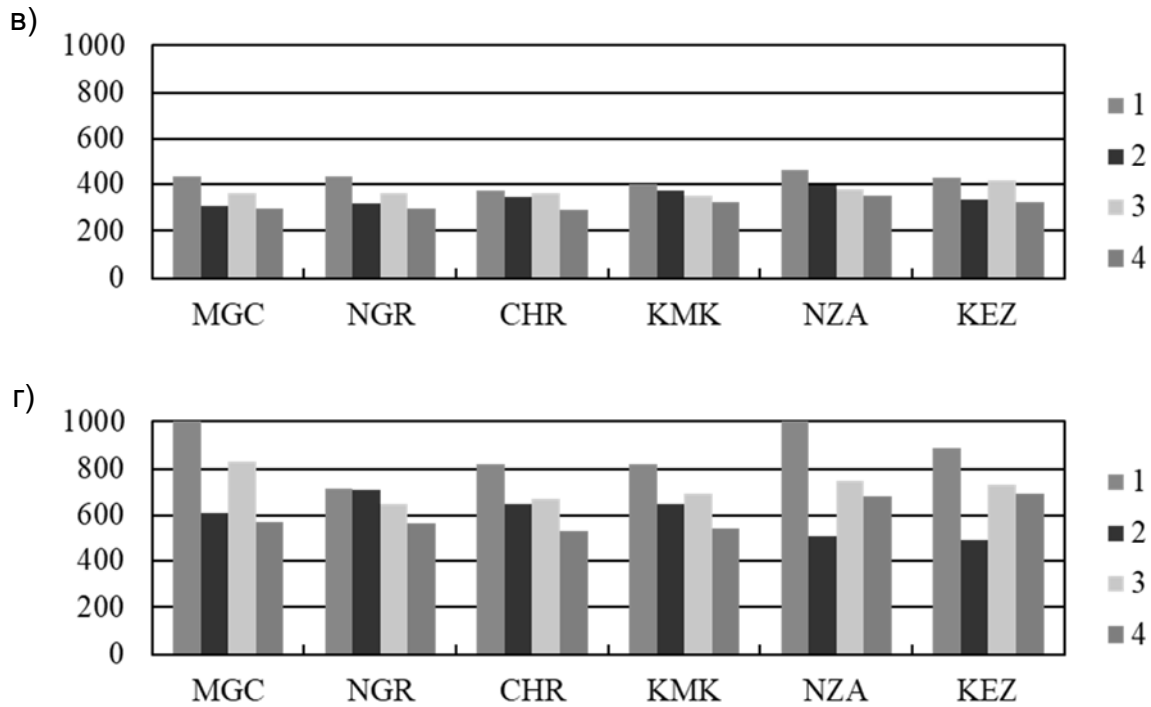


Рис. 4.16. Климатические риски в восточных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (4-я территориальная группа) в отношении свайных оснований (а) и ленточных или столбчатых фундаментов (б) при потеплении климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

На рисунке 4.17 показаны результаты моделирования климатических рисков для пятой территориальной группы. *Автомобильный и железнодорожный профили* находятся на низком уровне риска ( $103 \leq R \leq 294$ ) с одиночным значением  $R = 361$  (средний риск). Для *аэродромного покрытия* в целом прогнозируется низкий (11 значений  $109 \leq R \leq 287$ ) или незначительный (5 значений  $77 \leq R \leq 83$ ) риск. *Свайное основание* находится на среднем уровне риска ( $305 \leq R \leq 437$ ) при одном близком значении  $R = 281$ . Наиболее ожидаемый риск для *ленточных*

и столбчатых фундаментов – высокий ( $601 \leq R \leq 755$ ), при одном значении на очень высоком уровне риска ( $R = 802$ ) и трех значениях – на среднем уровне ( $552 \leq R \leq 574$ ).

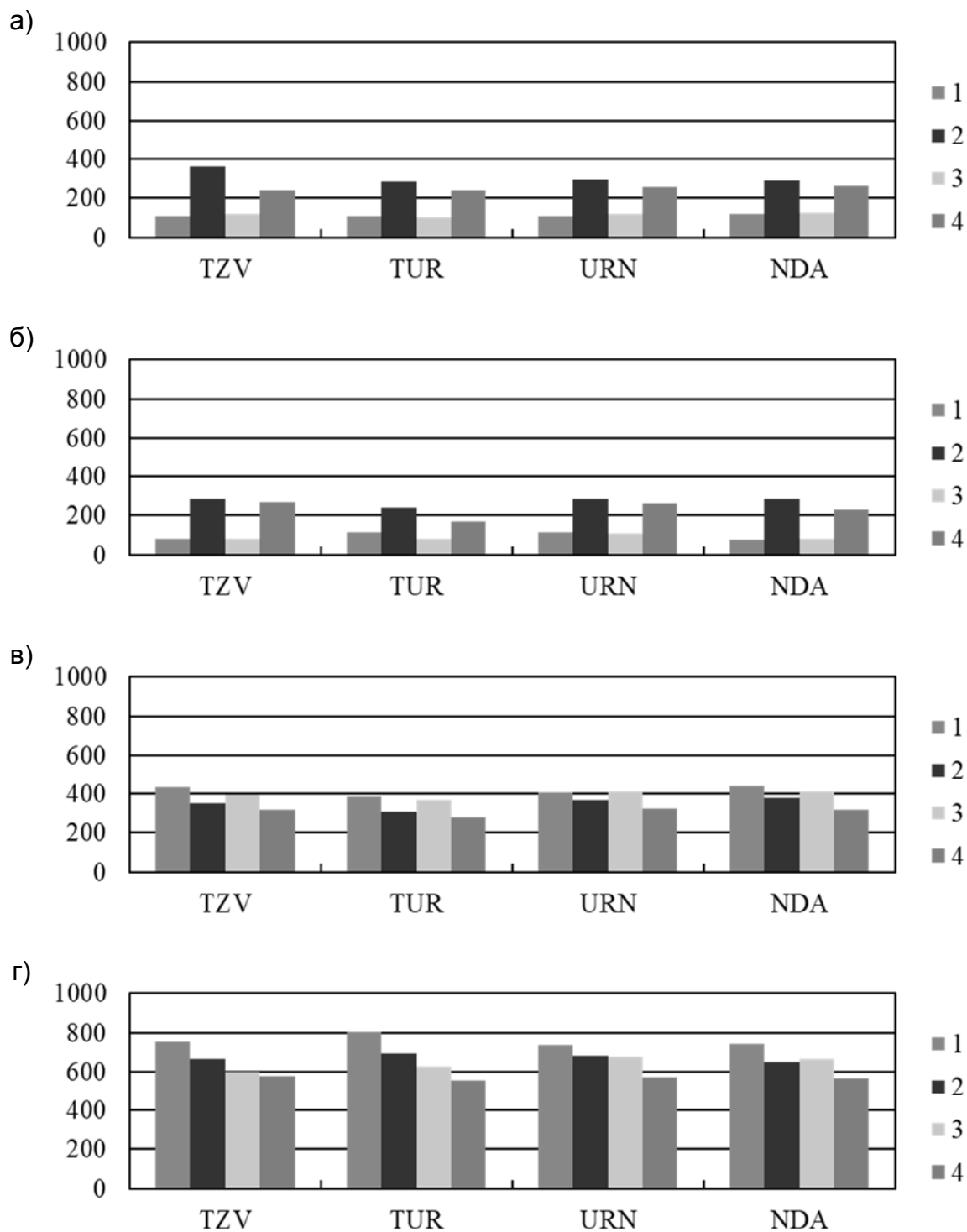


Рис. 4.17. Климатические риски в северных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (5-я территориальная группа) при потеплении климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

На рисунке 4.18 приведены результаты моделирования рисков для шестой территориальной группы. *Автомобильный и железнодорожный профили* находятся либо на низком уровне риска ( $101 \leq R \leq 292$  при одном значении  $R = 99$ ), либо на среднем уровне (6 значений  $305 \leq R \leq 401$ ). Риск в отношении *аэродромного покрытия* не выходит за пределы низкого (18 значений  $109 \leq R \leq 281$ ) и незначительного (6 значений  $70 \leq R \leq 94$ ) уровней.

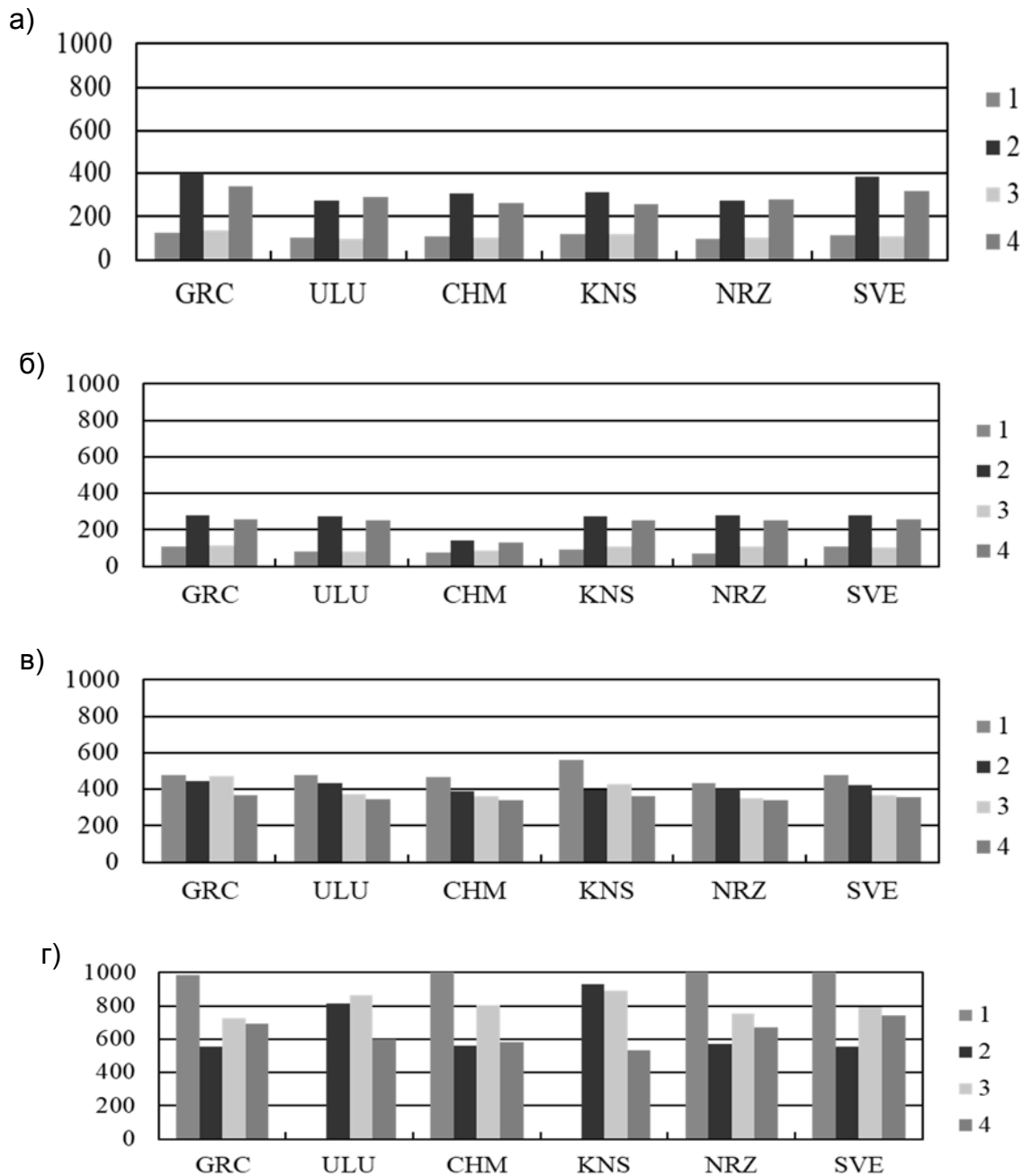


Рис. 4.18. Климатические риски в районах восточной границы криолитозоны (6-я территориальная группа) при потеплении климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

*Свайное основание* находится строго на среднем уровне риска ( $340 \leq R \leq 559$ ). Очень высокий (9 значений  $805 \leq R \leq 1000$ ) и высокий (5 значений  $669 \leq R \leq 793$ ) уровни риска получены для *ленточного или столбчатого фундамента*; 7 значений ( $535 \leq R \leq 599$ ) расположены вблизи верхней границы среднего риска.

Прогнозируемые риски для седьмой территориальной группы приведены на рис. 4.19. Уровень риска для *автодорожного и железнодорожного профилей* (рис. 4.19а) – в основном низкий (15 значений  $101 \leq R \leq 284$  при одном значении  $R = 98$ ); на среднем уровне получены 4 значения ( $319 \leq R \leq 357$ ). Незначительный (3 значения  $76 \leq R \leq 88$ ) и, как правило, низкий (11 значений  $103 \leq R \leq 282$  при одном значении  $R = 363$ ) уровни риска характеризуют *аэродромное покрытие* (рис. 4.19б).

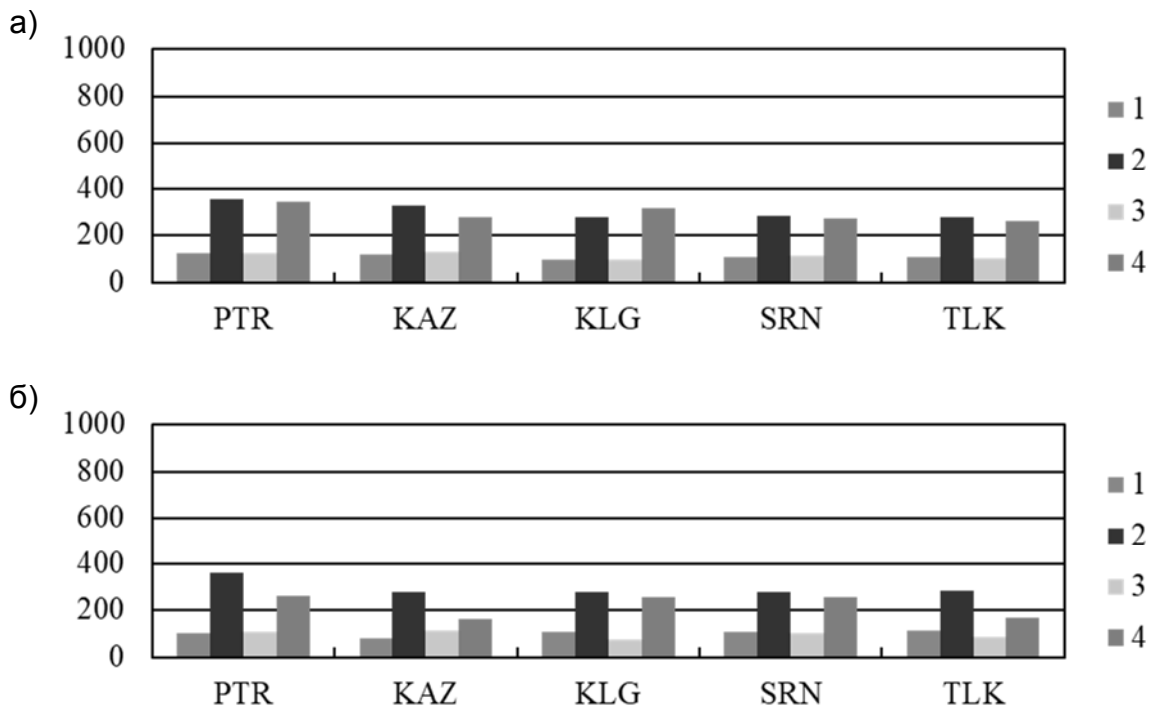


Рис. 4.19. Климатические риски в районах северо-западной границы криолитозоны (7-я территориальная группа) в отношении автодорожного и железнодорожного профиля (а) и аэродромного покрытия (б) при потеплении климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Средний уровень риска ( $321 \leq R \leq 529$ ) характерен для *свайного основания* (рис. 4.20а). Очень высокий риск прогнозируется для *ленточных и столбчатых фундаментов* (рис. 4.20б), расположенных



в грунтах с малой влажностью (8 значений  $813 \leq R \leq 1000$  и 2 значения  $R = 742$  и  $R = 759$ ), при повышении влажности риск снижается до высокого уровня для глинистых грунтов ( $619 \leq R \leq 673$ ), и до среднего уровня ( $475 \leq R \leq 581$ ) – для песчаных.

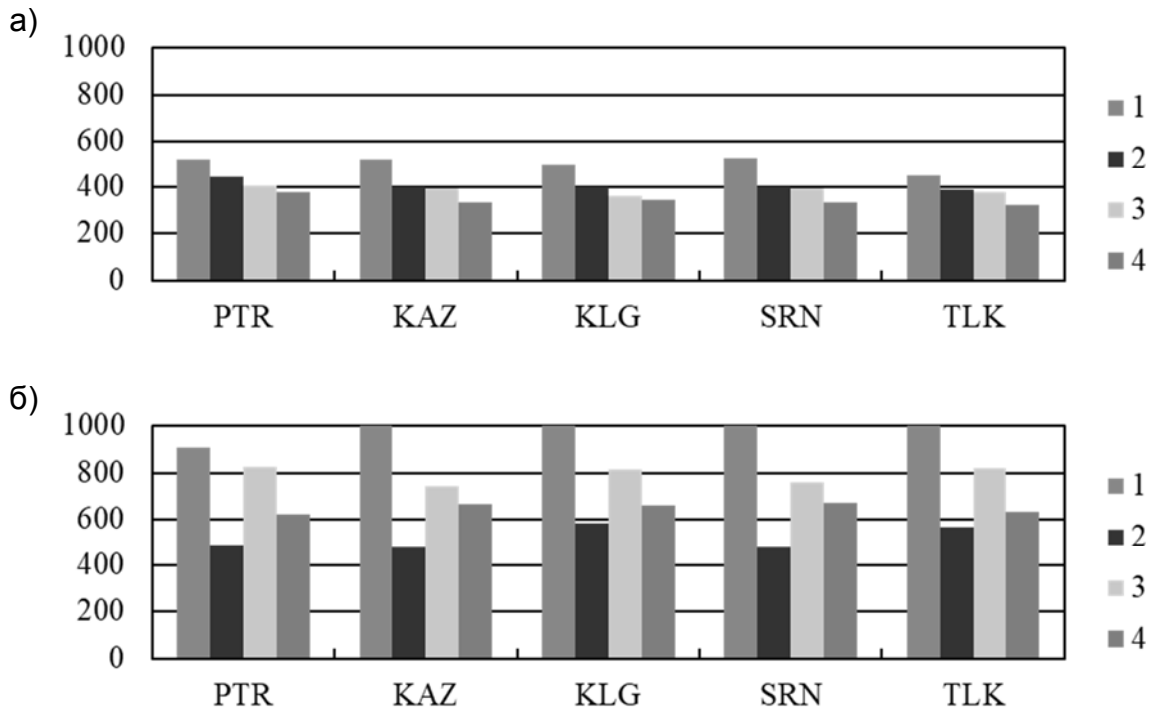


Рис. 4.20. Климатические риски в районах северо-западной границы криолитозоны (7-я территориальная группа) в отношении свайных оснований (а) и ленточных или столбчатых фундаментов (б) при потеплении климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Риски для восьмой территориальной группы показаны на рис. 4.21. Влагонасыщенные грунты обуславливают средний уровень риска ( $332 \leq R \leq 493$ ) для *автодорожного и железнодорожного профилей*; в относительно сухих грунтах уровень риска низкий ( $129 \leq R \leq 190$ ). Также низкие риски ( $107 \leq R \leq 157$ ) в грунтах малой влажности прогнозируются для *аэродромного покрытия*; при высокой влажности грунта риск может находиться на низком (6 значений  $271 \leq R \leq 298$ ) или среднем (6 значений  $358 \leq R \leq 419$ ) уровнях. В отношении *свайного основания* ожидаются средние (10 значений  $379 \leq R \leq 600$ ) и высокие (14 значений  $604 \leq R \leq 725$ ) риски. Достаточно сильная зависимость климатического риска от внешних условий отмечается для

ленточного или столбчатого фундамента: риск может быть очень высоким (7 значений  $807 \leq R \leq 1000$ ), высоким (12 значений  $603 \leq R \leq 796$ ) или средним (5 значений  $406 \leq R \leq 577$ ).

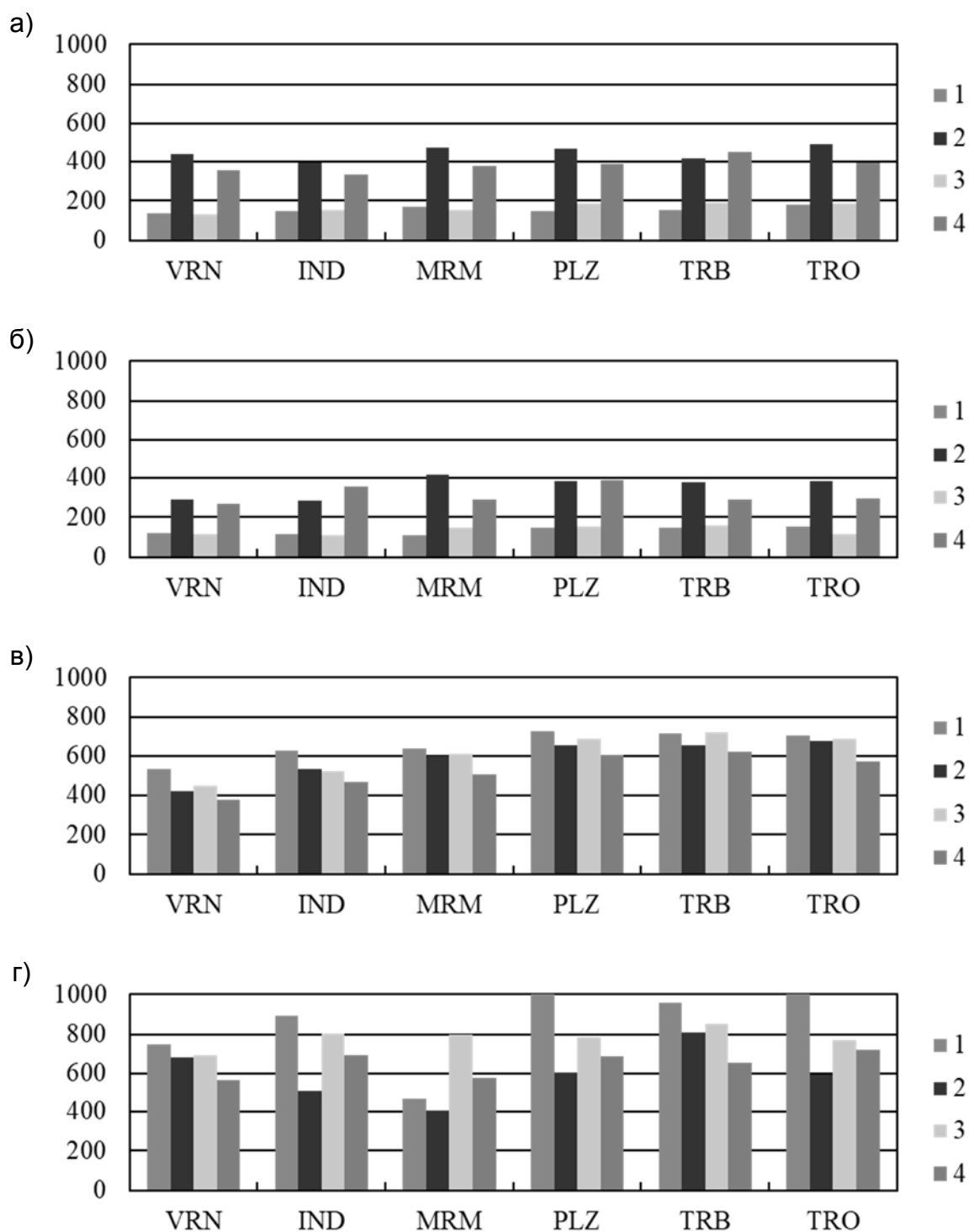


Рис. 4.21. Климатические риски в районах Кольского полуострова и южного побережья Баренцева моря (8-я территориальная группа) при потеплении климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Потепление климата, по сравнению с увеличением его контрастности, приводит к ощутимо более высоким рискам для объектов транспортной инфраструктуры. Риски в отношении *автодорожного и железнодорожного профилей и аэродромного покрытия* в отдельных случаях достигают среднего уровня (особенно в районах с высокотемпературной мерзлотой). Средний уровень риска является наиболее характерным для *свайного основания*, причем достаточно часто риск приближается к верхней границе этого уровня и даже иногда переходит на высокий уровень. *Ленточные или столбчатые фундаменты* в большинстве случаев находятся на высоком или очень высоком уровне климатических рисков.

#### **4.4. Оценка рисков объектам транспортной инфраструктуры при одновременном потеплении и повышении контрастности климата**

Совместное потепление климата и одновременное повышение его контрастности (модель С22) учитывалось как повышение всех температур на  $\tau_T^+ = +2^\circ\text{C}$ , после чего определялась среднегодовая температура в новых климатических условиях. Далее летние (положительные) температуры повышались еще на  $\tau_T^+ = +2^\circ\text{C}$ , а зимние (отрицательные) понижались до величин, при которых новая среднегодовая температура оставалась неизменной.

Оценка климатических рисков для первой территориальной группы показана на рис. 4.22. *Автодорожный и железнодорожный профили* характеризуются низким уровнем риска при грунтах малой влажности ( $163 \leq R \leq 200$ ), и средним – при большой влажности грунта ( $380 \leq R \leq 528$ ). Аналогичная картина наблюдается и для *аэродромного покрытия*:  $122 \leq R \leq 165$  при моделях G120 и G430 (низкий риск) и  $304 \leq R \leq 470$  при моделях G135 и G450 (средний риск). Риски в отношении *свайного основания* находятся на низком уровне только при наличии глинистого грунта высокой влажности ( $229 \leq R \leq 249$ ), для всех остальных грунтовых условий риск средний ( $301 \leq R \leq 477$ ).

при одном значении  $R = 295$ ). Для *ленточного или столбчатого фундамента* риск высокий ( $13$  значений  $629 \leq R \leq 798$ ) и очень высокий ( $6$  значений  $806 \leq R \leq 918$ ), с одним значением  $R = 599$ .

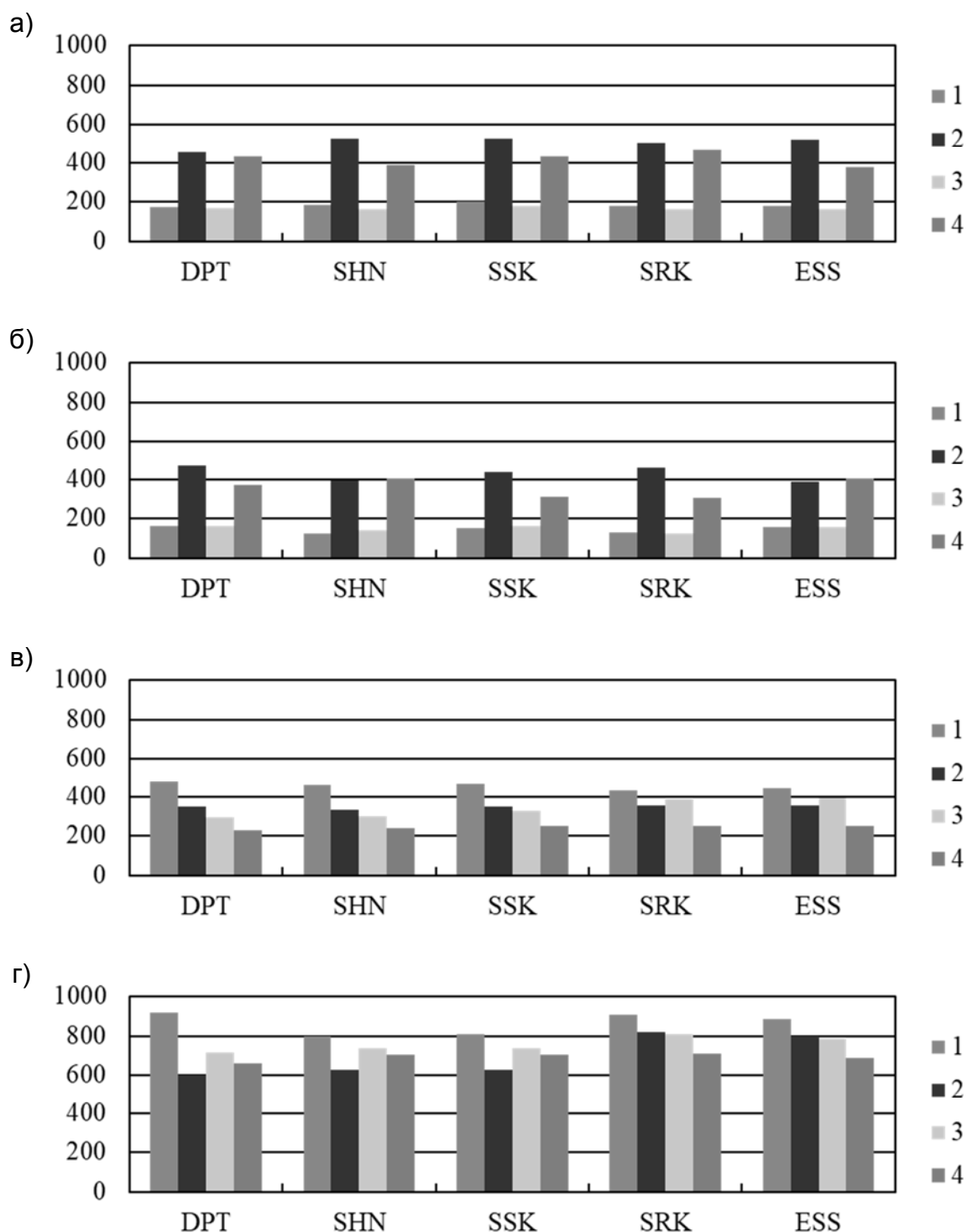


Рис. 4.22. Климатические риски в высокоширотных районах Якутии и Красноярского края (1-я территориальная группа) при совместном потеплении и повышении контрастности климата: типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Климатические риски для второй территориальной группы приведены на рис. 4.23.

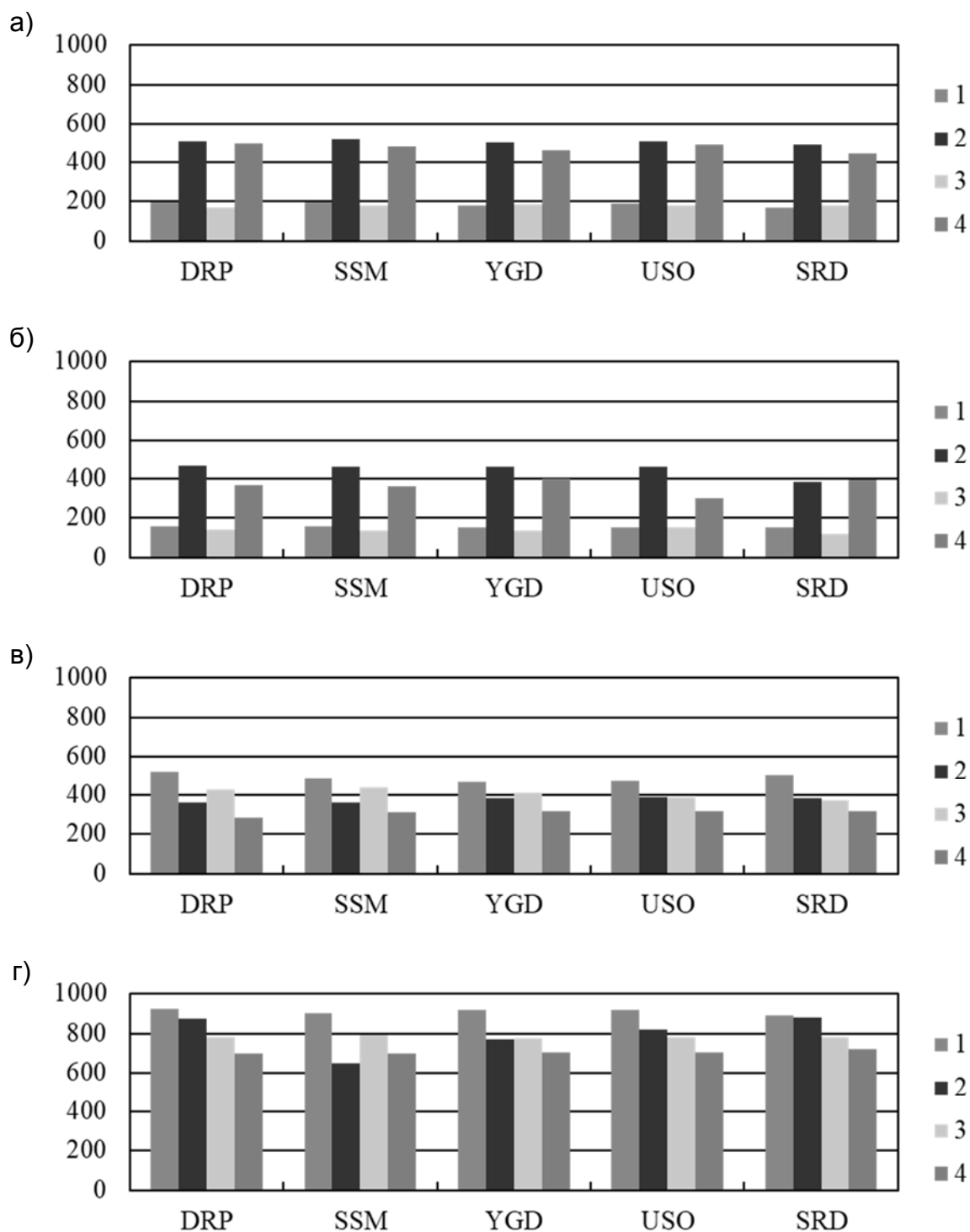


Рис. 4.23. Климатические риски в районах Магаданской области и восточных районах Якутии (2-я территориальная группа) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Риски в отношении *автодорожного и железнодорожного профилей* в сухих грунтах находятся на низком уровне ( $171 \leq R \leq 198$ ); с ростом влажности увеличиваются и риски, достигая среднего уровня ( $442 \leq R \leq 519$ ) в моделях G135 и G450. *Аэродромное покрытие* также находится на низком уровне риска ( $120 \leq R \leq 159$ ) при сухих грунтах, и на среднем уровне ( $301 \leq R \leq 466$ ) – при влажных. Риски в отношении *свайного основания* при всех грунтовых моделях находятся на среднем уровне ( $287 \leq R \leq 520$ ). Ленточный и столбчатый фундаменты подвержены высокому (12 значений  $646 \leq R \leq 782$ ) и очень высокому (8 значений  $822 \leq R \leq 924$ ) риску.

На рисунках 4.24-4.25 показаны прогнозные риски для третьей территориальной группы. *Автомобильный и железнодорожный профили* (рис. 4.24) находятся на низком уровне риска ( $161 \leq R \leq 177$ ) при сухих грунтах в основании, и на среднем уровне ( $389 \leq R \leq 513$ ) при грунтах высокой влажности. Несколько ниже количественные оценки риска для *аэродромного покрытия* (рис. 4.25а), при тех же уровнях риска (при моделях G120 и G430 – низкий уровень,  $120 \leq R \leq 159$ , и при моделях G135 и G450 – средний уровень,  $301 \leq R \leq 456$ ). Риски для *свайного основания* (рис. 4.25б) при любых грунтах находятся на среднем уровне ( $303 \leq R \leq 525$ ). Для *ленточного или столбчатого фундамента* (рис. 4.25в) риски колеблются от высоких ( $708 \leq R \leq 758$  в грунте G450) до очень высоких ( $804 \leq R \leq 920$  для остальных видов грунта).

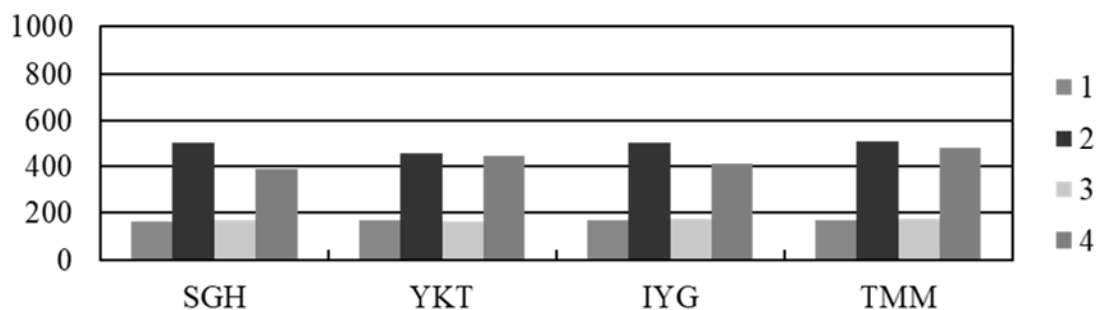


Рис. 4.24. Климатические риски в центральных и западных районах Якутии (3-я территориальная группа) в отношении автодорожного и железнодорожного профилей при совместном потеплении и повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

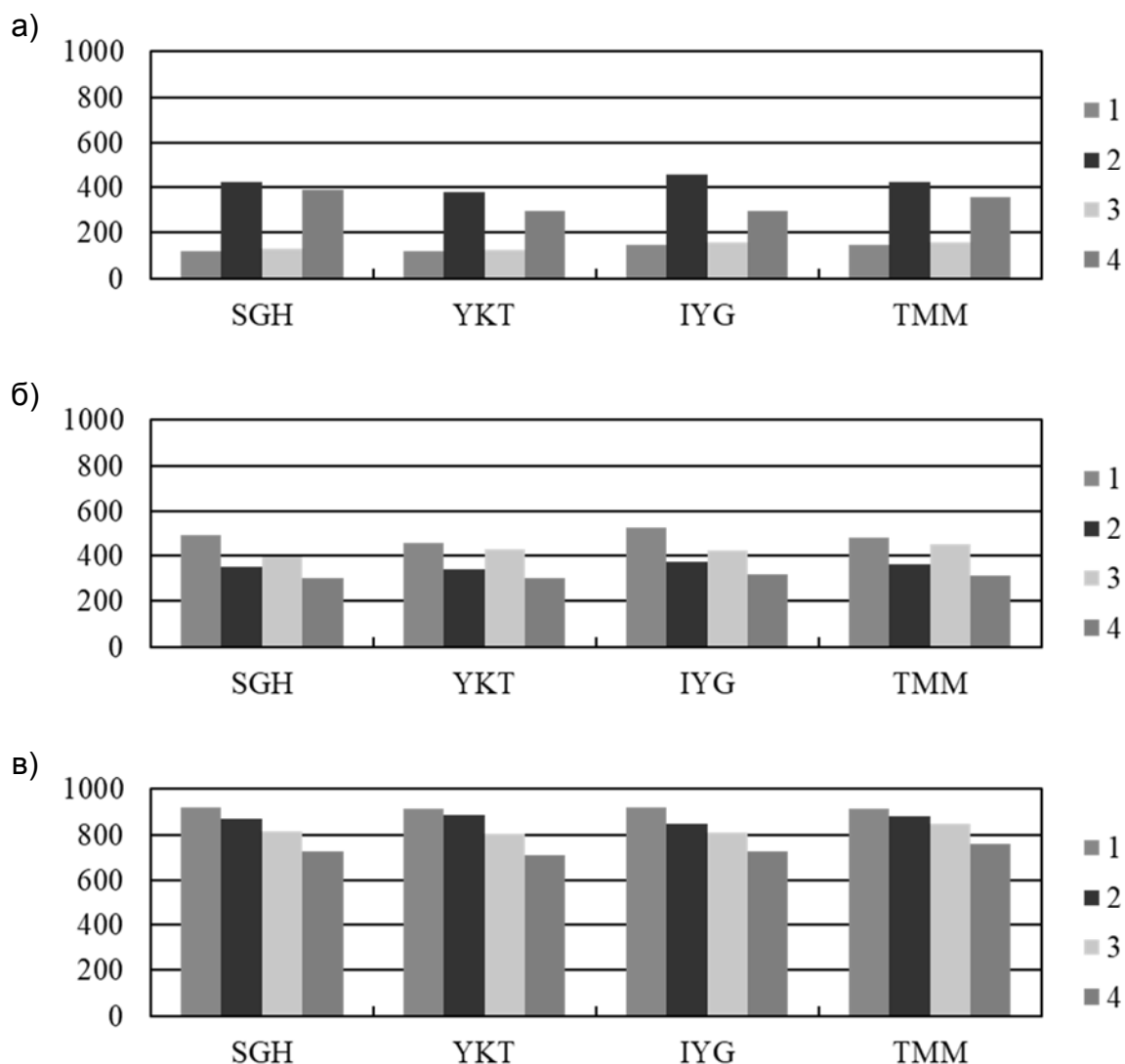


Рис. 4.25. Климатические риски в центральных и западных районах Якутии (3-я территориальная группа) в отношении аэродромного покрытия (а), свайного основания (б) и ленточного или столбчатого фундамента (в) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Результаты моделирования рисков для четвертой территориальной группы показаны на рис. 4.26. Риски для *автодорожного и железнодорожного профилей* стабильно низкие при сухих грунтах ( $171 \leq R \leq 196$ ) и находятся на среднем уровне (приближаясь к высокому уровню) при грунтах высокой влажности ( $456 \leq R \leq 546$ ). Такая же картина характерна для *аэродромного покрытия* ( $143 \leq R \leq 155$  для моделей G120 и G430, и  $347 \leq R \leq 452$  для моделей G135 и G450). *Свайное основание* практически при всех грунтовых и климатических

условиях подвержено средним климатическим рискам ( $336 \leq R \leq 579$  при одном значении  $R = 615$ ).

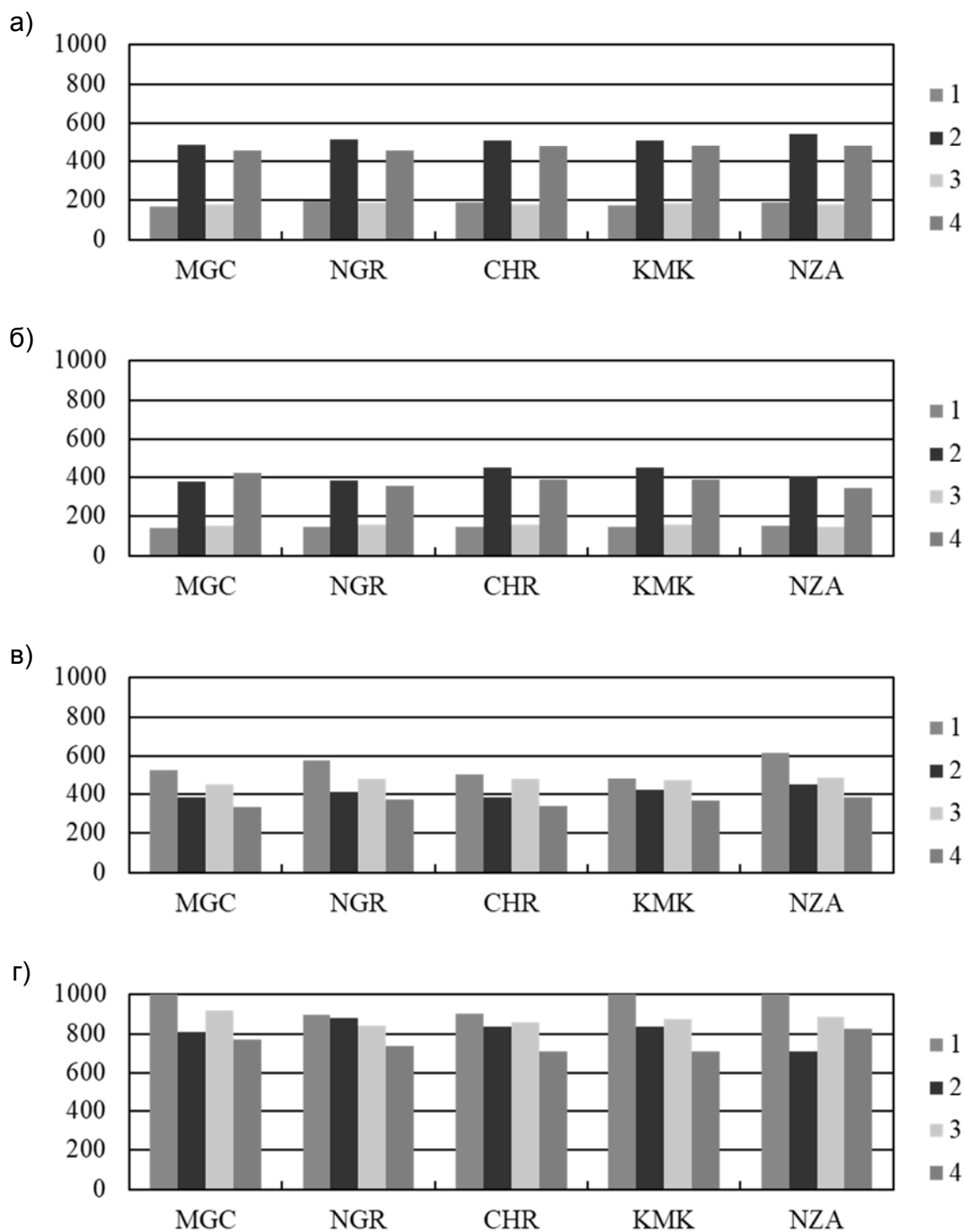


Рис. 4.26. Климатические риски в восточных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (4-я территориальная группа) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1



*Ленточные и столбчатые фундаменты* в основном находятся на очень высоком уровне риска ( $15$  значений  $806 \leq R \leq 1000$ ), и только в отдельных случаях – на высоком уровне ( $5$  значений  $708 \leq R \leq 768$ ).

Прогнозные климатические риски для пятой территориальной группы в отношении *автодорожного и железнодорожного профилей* (рис. 4.27а) низкие при моделях грунта G120 и G430 ( $173 \leq R \leq 199$ ) и средние – при моделях G135 и G450 ( $404 \leq R \leq 519$ ). На таких же уровнях (в зависимости от влажности грунта) находится риск в отношении *аэродромного покрытия* – рис. 4.27б ( $129 \leq R \leq 186$  и  $354 \leq R \leq 521$  соответственно).

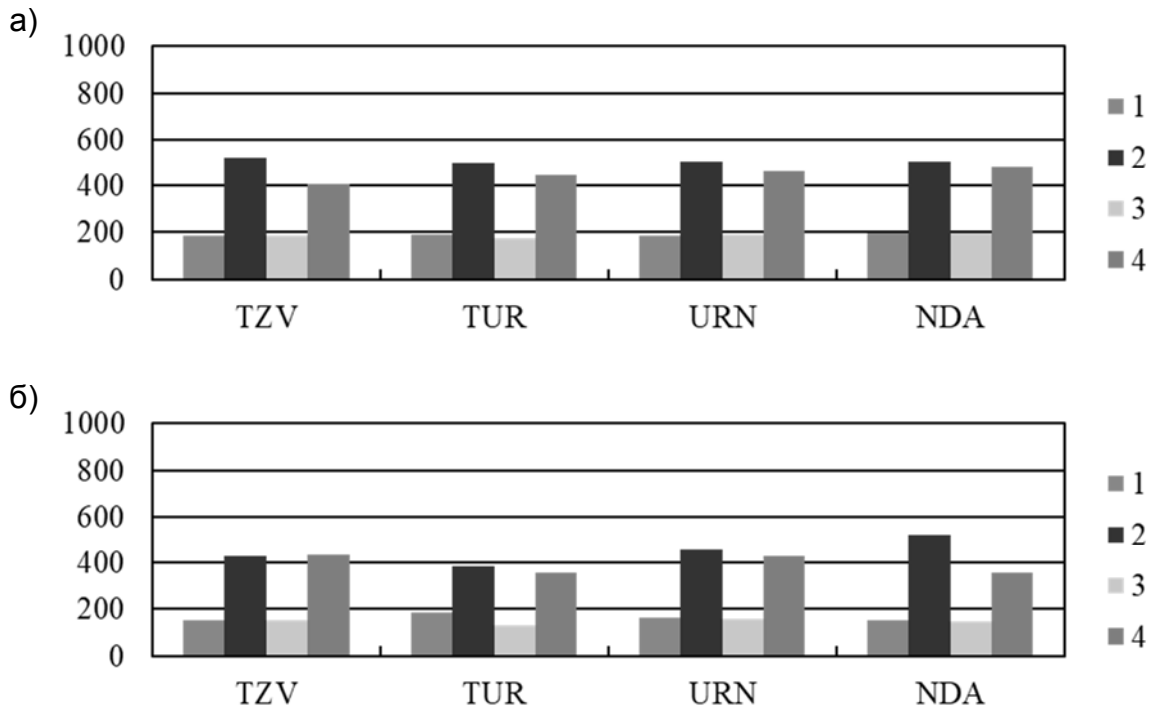


Рис. 4.27. Климатические риски в северных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (5-я территориальная группа) в отношении автодорожного и железнодорожного профилей (а) и аэродромного покрытия (б) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Для *свайного основания* (рис. 4.28а) прогнозируются средние риски ( $324 \leq R \leq 527$ ). *Ленточный и столбчатый фундаменты* (рис. 4.28б) могут находиться на высоком ( $700 \leq R \leq 721$  для модели G450) или очень высоком ( $802 \leq R \leq 904$  при одном значении  $R = 769$  для остальных грунтовых моделей) уровне климатических рисков.

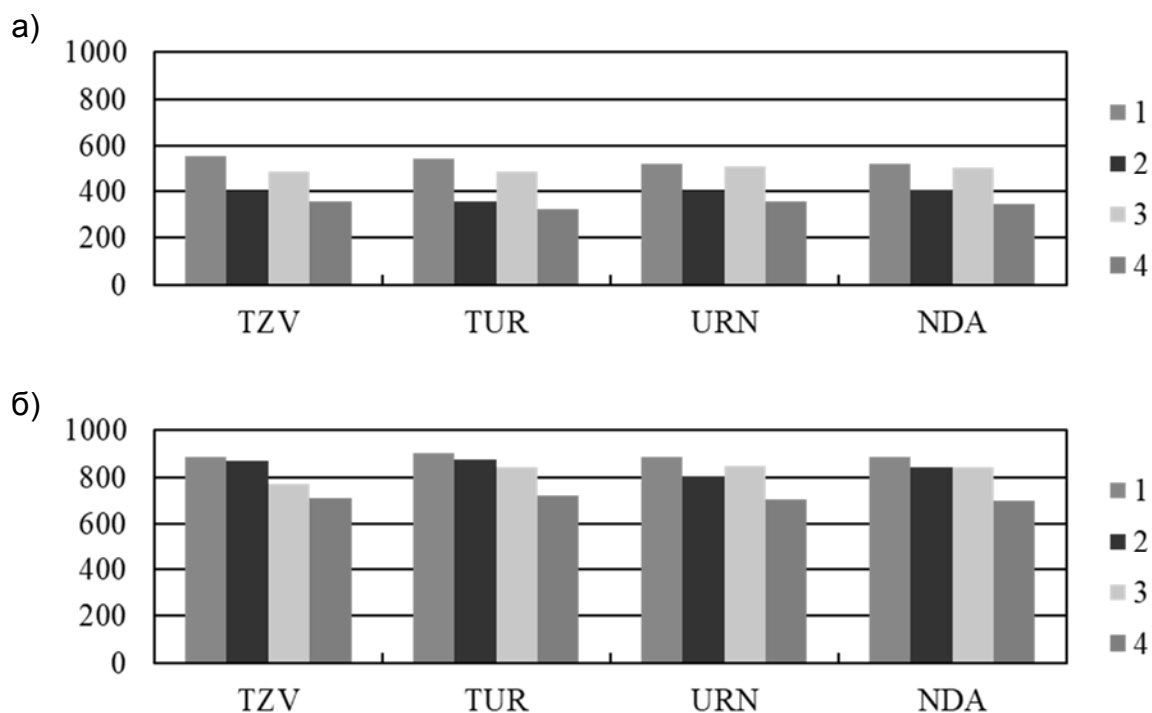


Рис. 4.28. Климатические риски в северных районах прерывистой и массивно-островной мерзлоты (5-я территориальная группа) в отношении свайного основания (а) и ленточных или столбчатых фундаментов (б) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

На рисунке 4.29 показаны результаты моделирования рисков для шестой территориальной группы в отношении *автодорожного и железнодорожного профилей*. Риски растут с увеличением влажности грунта от низкого ( $154 \leq R \leq 214$ ) до среднего ( $440 \leq R \leq 584$ ) уровня.

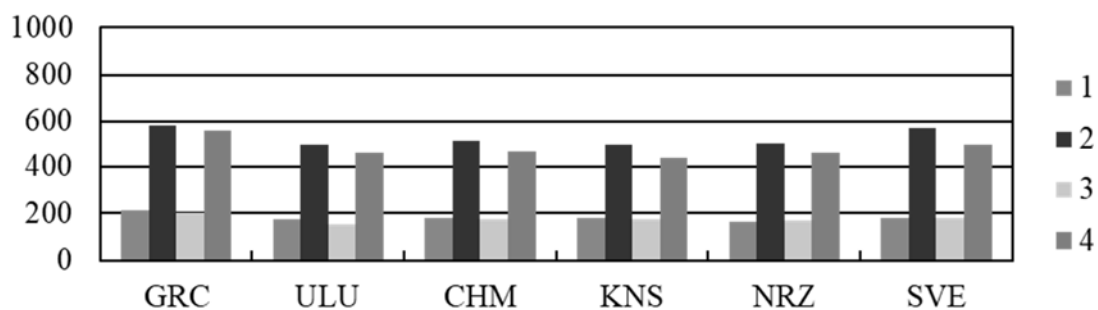


Рис. 4.29. Климатические риски в районах восточной границы криолитозоны (6-я территориальная группа) в отношении автодорожного и железнодорожного профилей при совместном потеплении и повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Такая же тенденция изменения риска характерна и для *аэродромного покрытия* ( $137 \leq R \leq 181$  и  $351 \leq R \leq 504$ ) – рис. 4.30а. Риски в отношении *свайного основания* (рис. 4.31б) – средние ( $304 \leq R \leq 587$ ), с двумя значениями  $R = 632$  и  $R = 644$ . *Ленточные и столбчатые фундаменты* (рис. 4.31в) подвержены риску на очень высоком (17 значений  $801 \leq R \leq 1000$ ) или высоком (7 значений  $737 \leq R \leq 775$ ) уровнях.

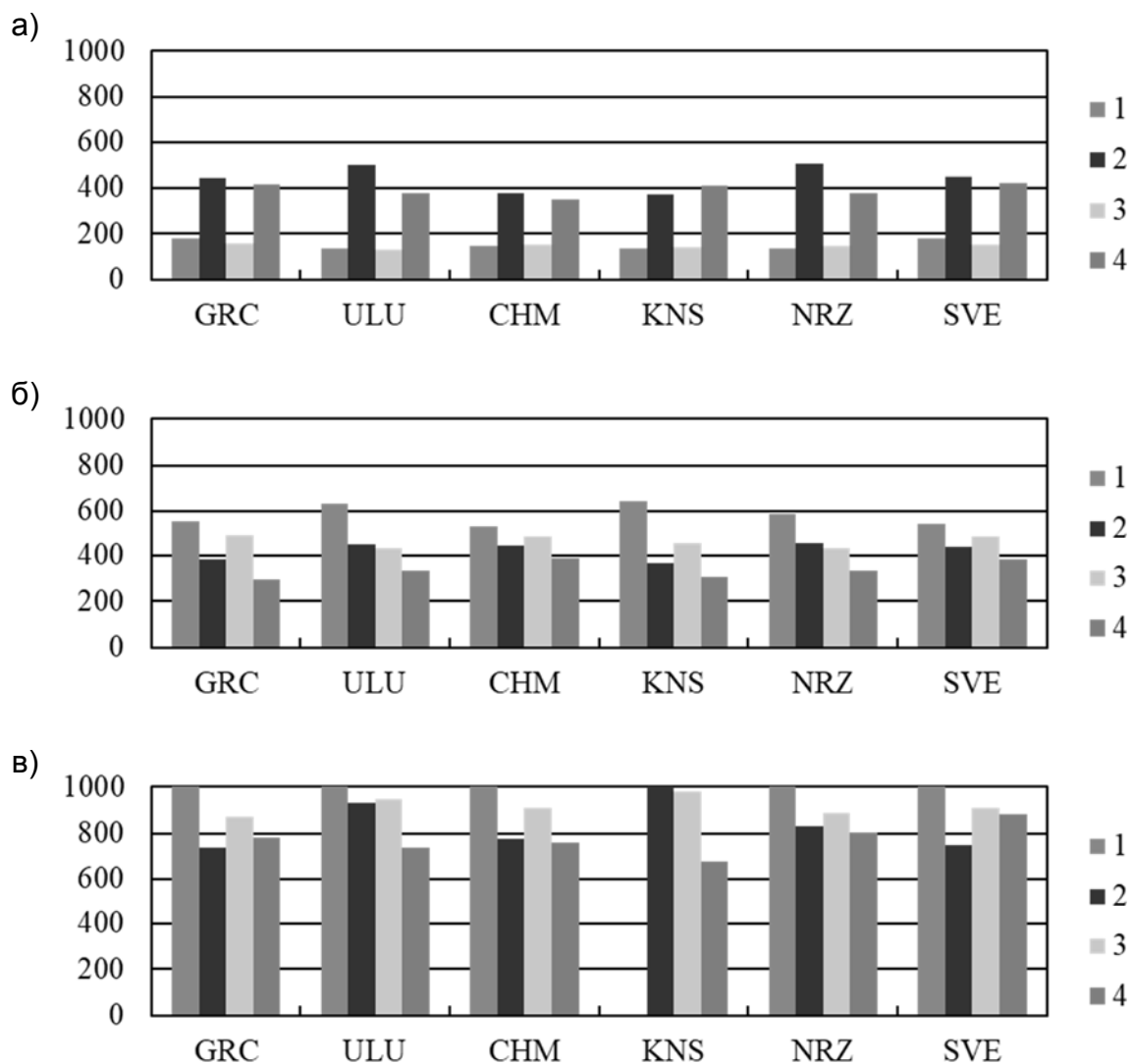


Рис. 4.30. Климатические риски в районах восточной границы криолитозоны (6-я территориальная группа) в отношении аэродромного покрытия (а), свайного основания (б) и ленточного или столбчатого фундамента (в) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Прогнозные климатические риски для седьмой территориальной группы приведены на рис. 4.31.

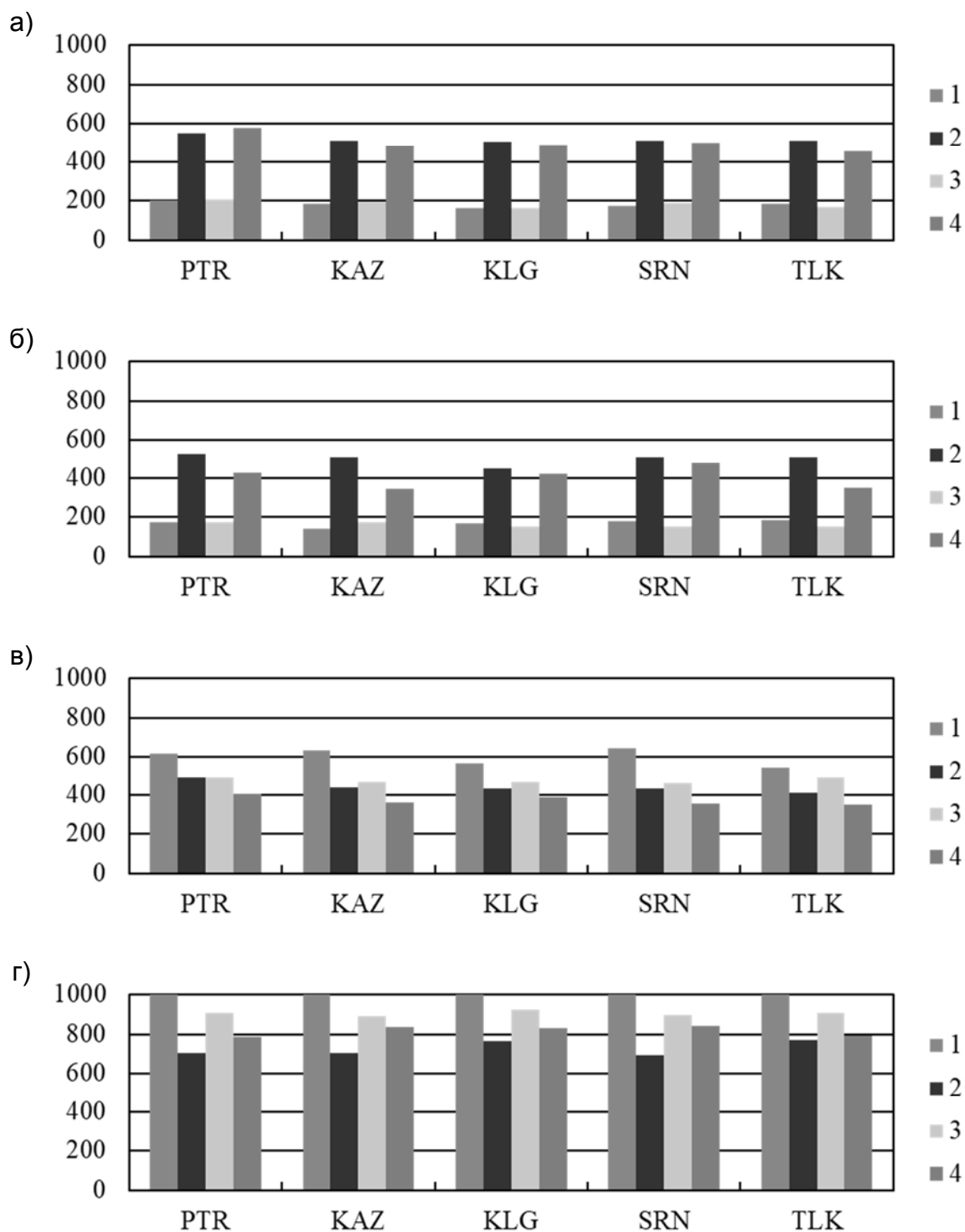


Рис. 4.31. Климатические риски в районах северо-западной границы криолитозоны (7-я территориальная группа) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Для автомобильного и железнодорожного профилей при моделях грунта G120 и G430 уровень риска низкий ( $166 \leq R \leq 209$ ), а при

моделях G135 и G450 – средний ( $457 \leq R \leq 575$ ). Для *аэродромного покрытия* риск также растет с увеличением влажности грунта – от низкого ( $143 \leq R \leq 183$  в грунтах низкой влажности) до среднего ( $347 \leq R \leq 526$  при влагонасыщенных грунтах). Риск в отношении *свайного основания*, как правило, находится на среднем уровне (17 значений  $353 \leq R \leq 568$ ), и только для модели G120 зафиксировано 3 значения на высоком уровне риска ( $617 \leq R \leq 642$ ). *Ленточные и столбчатые фундаменты* в сухих грунтах находятся на очень высоком уровне риска ( $889 \leq R \leq 1000$ ), причем для модели G120 все полученные значения риска являются максимально возможными ( $R = 1000$ ); в грунтах высокой влажности риск в основном высокий (7 значений  $692 \leq R \leq 794$ ) и, в отдельных случаях, очень высокий (3 значения  $828 \leq R \leq 844$ ).

На рисунке 4.32 показаны результаты моделирования климатических рисков для восьмой территориальной группы. Низкая влажность грунтов обуславливает низкие риски ( $224 \leq R \leq 281$ ) для *автодорожного и железнодорожного профилей*; в грунтах высокой влажности риски находятся между средним (5 значений  $546 \leq R \leq 597$ ) и высоким (7 значений  $609 \leq R \leq 677$ ) уровнями. Несколько меньше показатели риска для *аэродромного покрытия*:  $168 \leq R \leq 240$  при моделях грунта G120 и G430 (низкий риск), и  $421 \leq R \leq 582$  (средний риск) с одним значением  $R = 609$  при моделях G135 и G450. *Свайное основание* при грунтах низкой влажности характеризуется средним (3 значения  $525 \leq R \leq 578$ ) либо высоким (9 значений  $653 \leq R \leq 756$ ) уровнем риска; грунты высокой влажности обуславливают средний риск ( $348 \leq R \leq 570$  при одном значении  $R = 622$ ). *Ленточные и столбчатые фундаменты* в любых грунтах находятся на очень высоком (16 значений  $802 \leq R \leq 1000$ ) или высоком (8 значений  $664 \leq R \leq 799$ ) уровнях риска.

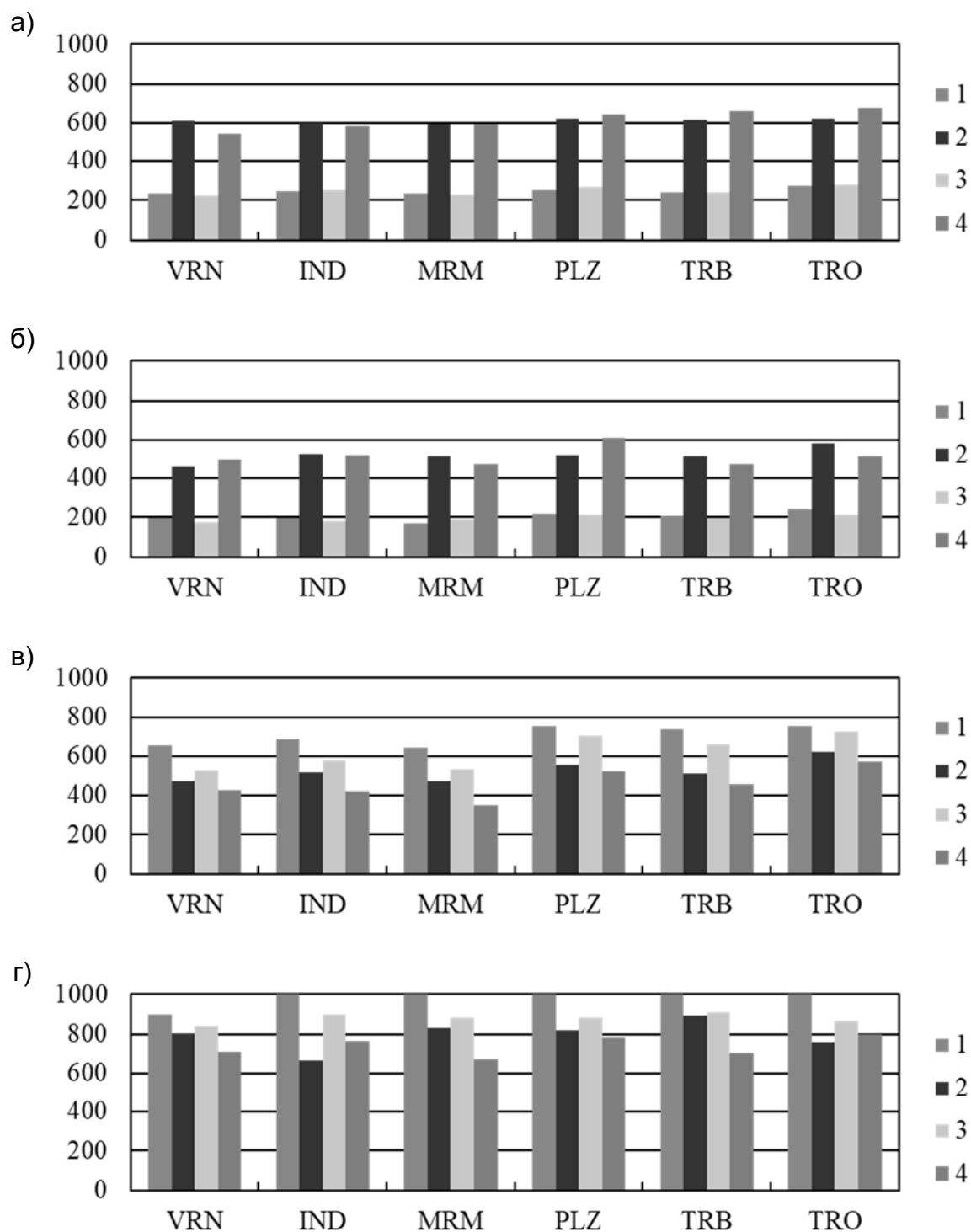


Рис. 4.32. Климатические риски в районах Кольского полуострова и южного побережья Баренцева моря (8-я территориальная группа) при совместном потеплении и повышении контрастности климата; типы объектов а) – г) и модели грунта 1–4 см. рис. 4.1

Совместное влияние потепления климата и повышения его контрастности обуславливают максимальные риски из всех трех рас-

смотренных вариантов климатических изменений. Риски для *автодорожного и железнодорожного профилей* находятся на низком уровне в песчаных грунтах, а в глинистых грунтах количественные оценки риска находятся в верхней половине среднего уровня, в редких случаях переходя на высокий уровень. *Аэродромное покрытие* характеризуется аналогичной картиной зависимости рисков от грунтовых условий, значения количественных оценок риска ниже примерно на 10-20%. *Свайное основание* характеризуется средними и, в отдельных случаях, низкими рисками в районах сплошной (низкотемпературной) мерзлоты; по мере перехода мерзлоты к островному и редко-островному типу климатические риски растут, достигая высокого уровня (в первую очередь в сухих песчаных грунтах). Максимальные риски прогнозируются для *ленточных и столбчатых фундаментов* – во всех климатических и грунтовых условиях они не опускаются ниже высокого уровня, при наличии большого количества оценок риска на очень высоком уровне (в том числе максимально возможных значений риска  $R = 1000$ ).

## **Глава 5. МЕРЫ ПО АДАПТАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ**

### **5.1. Конструкции для защиты температурного режима грунта от климатических изменений**

В зависимости от инженерно-геологических условий, конструкций фундаментов, особенности работы системы «основание-сооружение» для защиты грунта от чрезмерного повышения его температуры могут быть использованы различные варианты термостабилизаторов грунта. Принцип работы всех видов сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ) одинаков. Каждый из них состоит из герметичной трубы, в которой находится теплоноситель – хладагент: углекислота, аммиак и др. Труба состоит из двух секций. Одна секция размещается в земле и называется испарителем. Вторая, радиаторная секция трубы, расположена на поверхности. Когда температура окружающей среды опускается ниже температуры земли, где залегает испаритель, пары хладагента начинают конденсироваться в радиаторной секции. В результате снижается давление, и хладагент в испарительной части начинает вскипать и испаряться. Этот процесс сопровождается переносом тепла из испарительной части в радиаторную.

Таким образом, основным принципом работы всех СОУ является отвод тепла из грунтового массива (его замораживание или промораживание). Работают СОУ за счет отрицательных температур атмосферного воздуха в зимнее время и не требуют энергетических затрат в процессе эксплуатации. В основном используются парожидкостные сезонно-охлаждающие устройства с хладагентами фреон 12 и аммиак. При относительно небольших конструкциях СОУ могут обеспечивать достаточно большой эффект промораживания грунта.

С целью сравнения эффективности СОУ с различными конструктивными (геометрическими) параметрами для каждого вида объектов транспортной инфраструктуры рассматривалось по три типа термостабилизаторов. Обозначение типа СОУ в дальнейшем выполняется



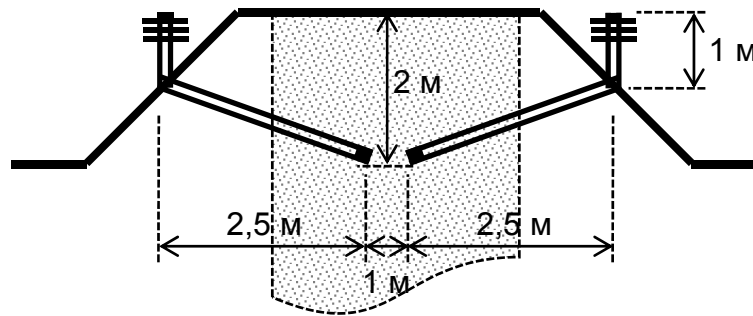
в виде  $XYZ$ , где  $X$  соответствует типу объекта (1 – автомобильный или железнодорожный профиль, 2 – аэродромное покрытие, 3 – свайное основание, 4 – ленточный или столбчатый фундамент),  $Y$  обозначает подтип СОУ (А, В или С),  $Z$  определяет расстояние  $d$  между термостабилизаторами вдоль объекта:

$$d = 1 + 0,2Z, \quad (5.1)$$

где  $d$  выражается в метрах;  $Z = 0 \dots 9$  (таким образом, возможно моделирование расстояния между термостабилизаторами от 1 до 2,8 м).

Термостабилизаторы предполагаются размещенными попарно, симметрично относительно центральной оси объекта. На рисунке 5.1 показано размещение СОУ для защиты температурного режима грунтов в основании автомобильного или железнодорожного профиля.

а)



б)

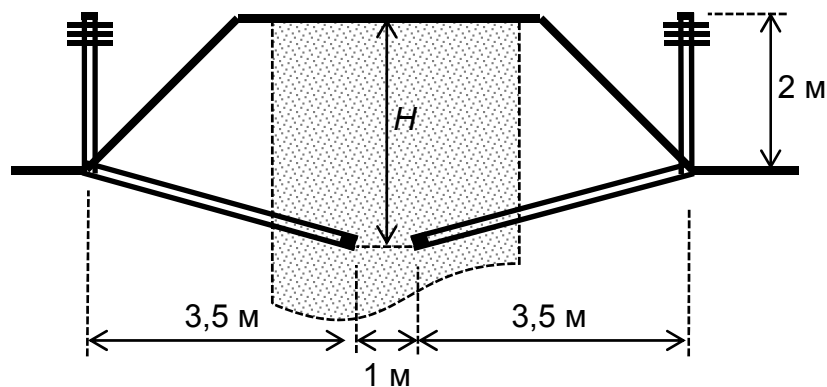
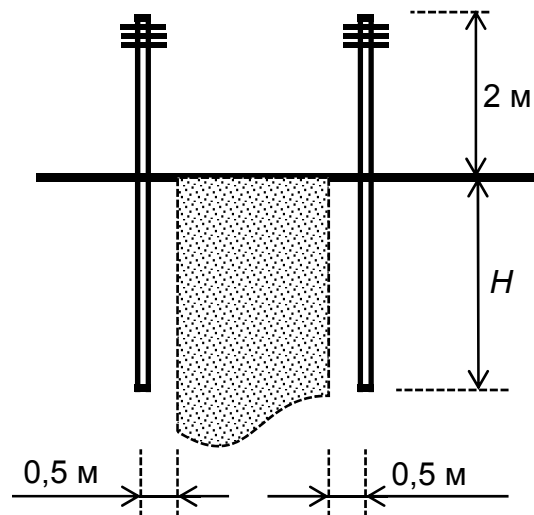


Рис. 5.1. Геометрические размеры сезонно-охлаждающих устройств для снижения климатических рисков в отношении автодорожного и железнодорожного профилей: а) – тип 1А, б) – типы 1В ( $H=3$  м) и 1С ( $H=4$  м)

Поскольку критериальным показателем для объектов данного вида является величина осадки, а она возникает только в оттаивающих грунтах, необходимо избегать промораживания грунта чересчур близко к поверхности, где сформированное в зимний период ядро холода будет быстро разрушено в летний период и не окажет заметного влияния на уменьшение общей осадки. Также и слишком глубокое ядро холода не сможет оказать заметного влияния на уменьшение глубины оттаивания грунта. Для определения наиболее целесообразной глубины погружения испарительной части в грунт рассматривались три варианта – от 2 до 4 метров.

На рисунке 5.2 показано размещение СОУ для аэродромного покрытия и свайного основания. Очевидно, что для повышения эффективности промораживания объема грунтового массива (выделенного на рис. 5.2), температурное состояние которого учитывается при определении критериальных показателей, СОУ необходимо располагать максимально близко к границам этого объема. Наиболее целесообразная глубина погружения  $H$  должна подбираться применительно к конкретным грунтовым и температурным условиям.



*Рис. 5.2. Геометрические размеры и расположение сезонно-охлаждающих устройств для снижения климатических рисков в отношении аэродромного покрытия (тип устройства:  $H = 2\text{ м} - 2A$ ,  $H = 3\text{ м} - 2B$ ,  $H = 4\text{ м} - 2C$ ) и свайного основания (тип устройства:  $H = 2\text{ м} - 3A$ ,  $H = 3\text{ м} - 3B$ ,  $H = 4\text{ м} - 3C$ )*

Объем грунта, учитываемого при оценке климатических рисков для ленточного или столбчатого фундамента, располагается ниже

глубины их заложения; соответственно, и расположение термостабилизаторов в грунте должно в первую очередь обеспечить круглогодичное пребывание грунта под подошвой фундамента в мерзлом состоянии. Возможное расположение СОУ показано на рис. 5.3. Несмотря на более высокую эффективность промораживания грунта под подошвой (рис. 5.3б) данный вариант может быть технически сложно реализуемым, что приведет к необходимости использования промораживания грунта рядом с фундаментом (рис. 5.3а).

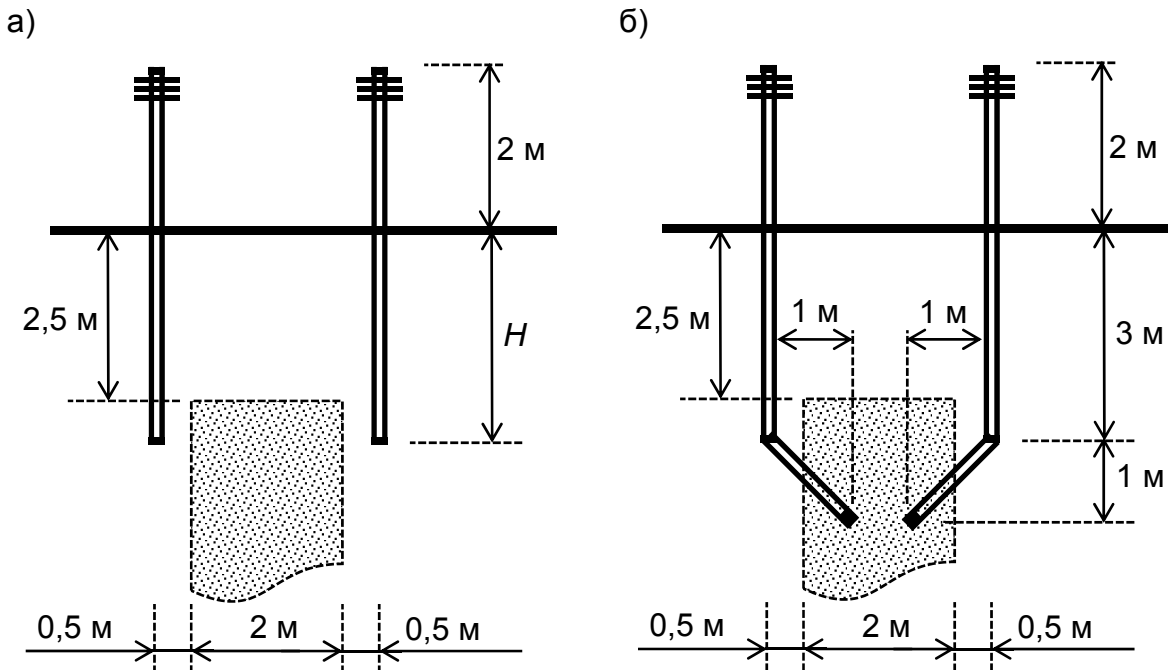


Рис. 5.3. Типы сезонно-охлаждающих устройств для снижения климатических рисков в отношении ленточных и столбчатых фундаментов: а) – типы устройств 4А ( $H = 3$  м) и 4В ( $H = 4$  м), б) – тип 4С

При назначении типоразмеров СОУ, эффективность которых в дальнейшем оценивалась количественно (как величина снижения климатического риска) учитывалось, что мощность термостабилизатора определяется максимально возможной интенсивностью отвода тепла от его радиаторной части. Соответственно, увеличение длины испарительной части не приводит к увеличению общего количества тепла, отводимого из грунта, а только вызывает более равномерное, но менее интенсивное промораживание грунта, прилегающего к подземной части термостабилизатора.

## **5.2. Анализ изменения температурного режима вечномерзлых грунтов в результате реализации инженерно-технических мероприятий по снижению климатических рисков**

Главной задачей, решаемой с использованием термостабилизаторов в отношении регулирования температурного режима вечномерзлого грунта, является сохранение ядра холода, сформированного в зимний период среднестатистического года, к моменту максимального оттаивания грунта, когда его несущая способность наименьшая. От успешного решения этой задачи зависит и степень понижения климатического риска, достигаемая при применении термостабилизаторов определенного типа. При этом необходимо обеспечить расположение сохраненного в летний период ядра холода именно в пределах области грунта, рассматриваемой при определении соответствующего критериального показателя. Наиболее трудно этого добиться в тех случаях, когда эта область сама расположена близко к поверхности, и ядро промораживания грунта имеет высокую вероятность полного разрушения в течение летнего периода, что приводит к сохранению климатического риска на прежнем уровне, определяемом при отсутствии термостабилизаторов. Аналогично, слишком далекое от рассматриваемой области грунта ядро холода, даже в случае его сохранения, не способно существенно повлиять на температурный режим этой области и обеспечить значимое сокращение климатического риска.

На рисунке 5.4 показано изменение температуры грунтового массива, характерного для автодорожного и железнодорожного профиля. Можно видеть, что с появлением рабочего цикла термостабилизаторов начинается формирование нескольких, первоначально не связанных между собой, ядер с пониженными температурами (рис. 5.4а). К наступлению периода с минимальными температурами воздуха отдельные ядра сливаются в единую область промораживания, хорошо видимую на рис. 5.4б. Однако по мере повышения температуры воздуха, особенно с началом летнего периода, накопленной мощности промороженной области оказывается недостаточно для

противостояния поступающему в грунт тепловому потоку, и ядро холода сохраняется только на глубине 3-4 м (рис. 5.4в), а верхний слой грунта имеет температуры, практически совпадающие с температурами при отсутствии термостабилизаторов. К периоду максимального оттаивания, когда деформативность профиля наибольшая, дополнительное ядро холода сохраняется в минимальных размерах и достаточно далеко по глубине (рис. 5.4г), что обуславливает относительно небольшое ожидаемое снижение климатического риска.

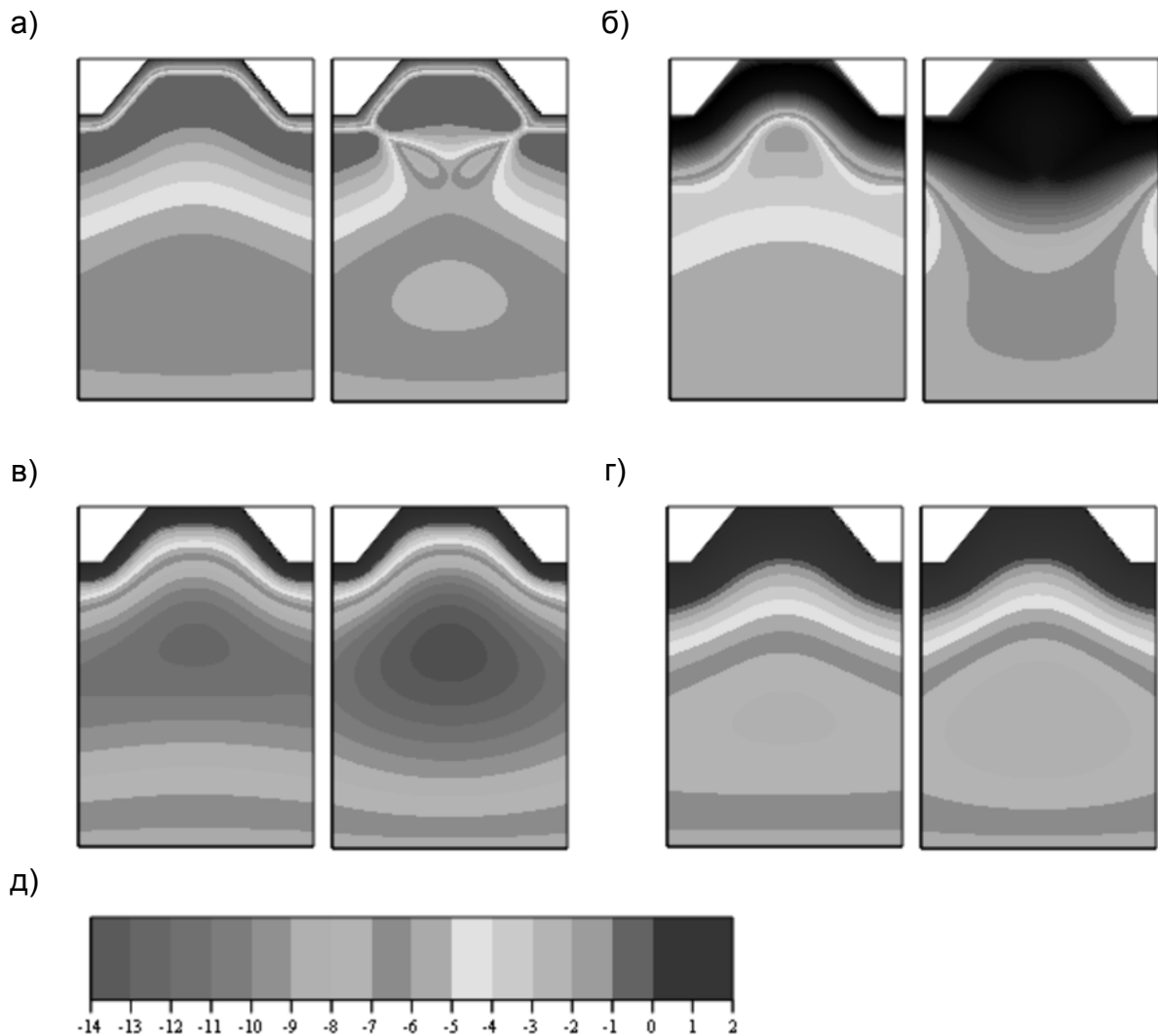
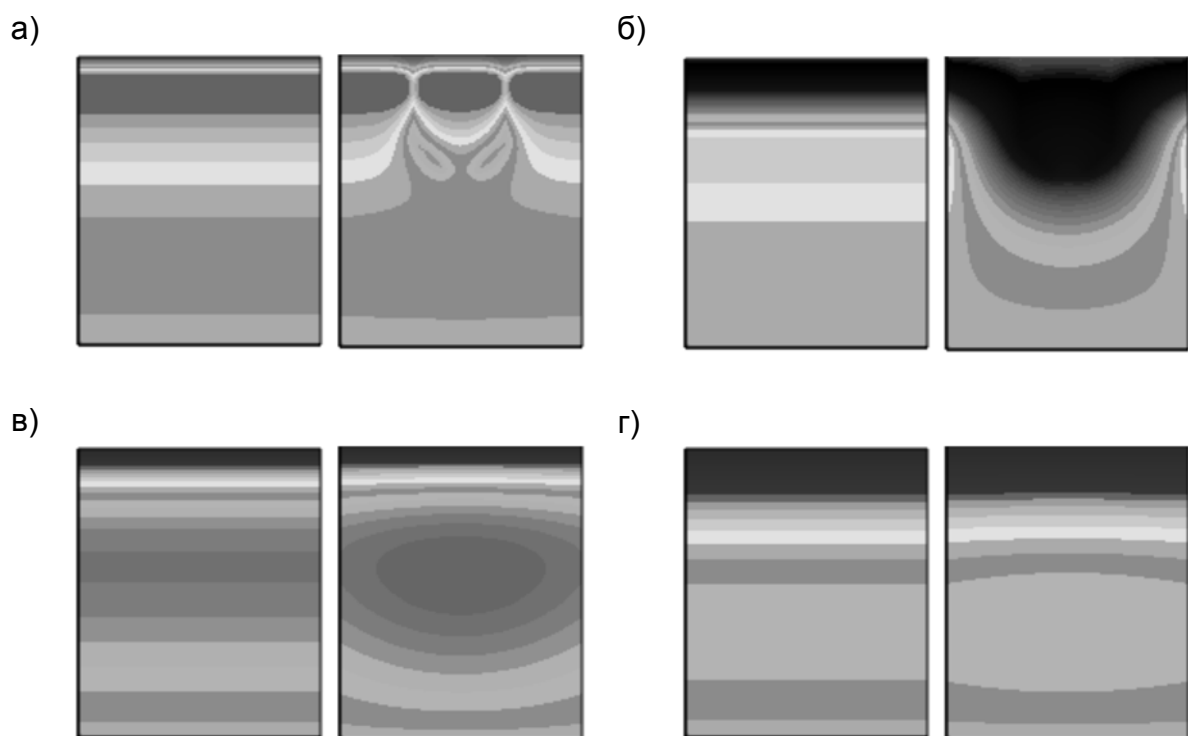


Рис. 5.4. Влияние термостабилизаторов на температурный режим грунтов в климатических условиях Якутска (климатическая модель C22, модель грунта G450), слева – отсутствие CO<sub>2</sub>, справа – CO<sub>2</sub> типа 1C0: а) – 1 ноября, б) – 1 января, в) – 1 июня, г) – 1 сентября, д) – температурная шкала

В случае горизонтальной поверхности грунтового массива, показанного на рис. 5.5, общая картина изменения температурного режима под влиянием термостабилизаторов сохраняется – первоначальное формирование отдельных ядер холода (рис. 5.5а), их слияние в единую область повышенного промораживания (рис. 5.5б), дальнейшее постепенное разрушение этой области по мере повышения температур воздуха (рис. 5.5в) и минимальное сохранение эффекта промораживания к концу летнего периода на глубине около 4 м (рис. 5.5г).

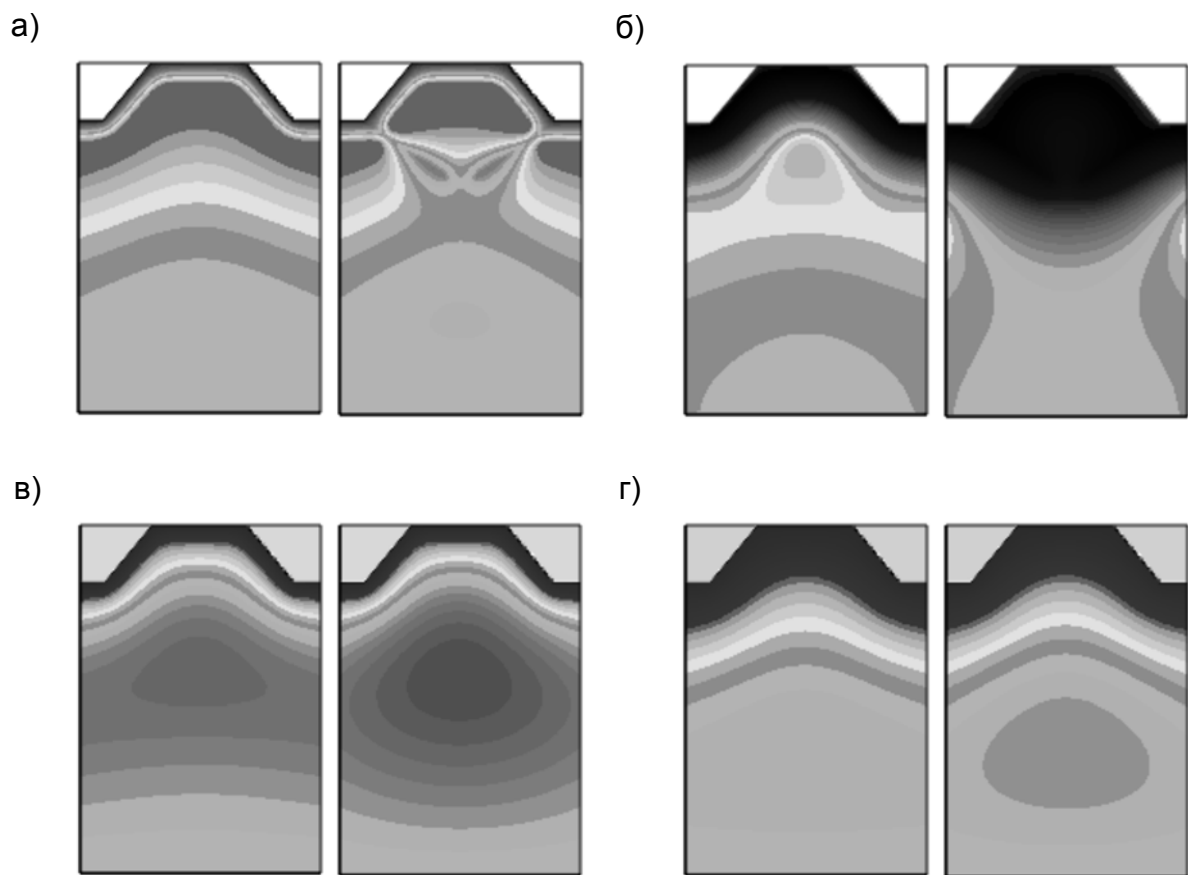


*Рис. 5.5. Влияние термостабилизаторов на температурный режим грунтов в климатических условиях Якутска (климатическая модель С22, модель грунта G450), слева – отсутствие СОУ, справа – СОУ типа 4С0:  
а) – 1 ноября, б) – 1 января, в) – 1 июня, г) – 1 сентября*

Однако существенное отличие рис. 5.5 от рис. 5.4 заключается в расположении области грунта, рассматриваемой при определении критериального показателя. Использование термостабилизаторов типа 4С0 (рис. 5.5) ориентировано на снижение рисков в отношении ленточных или столбчатых фундаментов, и рассматриваемая при оценке рисков область расположена ниже подошвы фундамента.

Именно на этих уровнях и наблюдается остаточный эффект от использования термостабилизаторов, что позволяет рассчитывать на значительно большее снижение климатического риска, чем в случае автодорожного или железнодорожного профиля (рис. 5.4).

На рисунке 5.6 можно видеть процессы формирования и разрушения ядра холода в климатических условиях Сого-Хая – близких к Якутску по температурному режиму воздуха, но с существенно более сильными ветрами. Остаточная мощность промороженной области (рис. 5.6г) в целом совпадает с областью, приведенной на рис. 5.4г.



*Рис. 5.6. Влияние термостабилизаторов на температурный режим грунтов в климатических условиях Сого-Хая (климатическая модель C22, модель грунта G120), слева – отсутствие СО<sub>2</sub>, справа – СО<sub>2</sub> типа 1C0:  
а) – 1 ноября, б) – 1 января, в) – 1 июня, г) – 1 сентября*

Эффективность использования термостабилизаторов в сухих песчаных грунтах показана в табл. 5.1. Маловлажные пески отличаются высокой скоростью выноса тепла (по состоянию на 1 декабря в

обоих случаях зафиксировано понижение температуры грунта, по сравнению с отсутствием термостабилизаторов, до 25 °С и более). Однако и поступление тепла в периоды повышения температуры воздуха также происходит повышенными темпами: к 1 июня среднестатистического года разница составляет менее 0,8 °С, а к моменту минимальной несущей способности основания (примерно 1 сентября) этот эффект становится практически незначимым (как правило, менее 0,1 °С). Соответственно, прогнозируемая эффективность термостабилизаторов в грунтах низкой влажности оценивается как незначительная.

Таблица 5.1

Сравнительная эффективность использования СОУ типа 1С0 для третьей территориальной группы (модель климат-грунт С22-G120)

Глубина, м	Изменение температуры грунта при использовании СОУ, °С							
	Якутск				Сого-Хая			
	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября
0,2	−0,010	−1,700	−0,040	−0,010	0,000	−1,250	−0,030	−0,010
0,4	−0,010	−3,030	−0,080	−0,020	−0,010	−2,610	−0,065	−0,020
0,6	−0,011	−4,390	−0,112	−0,030	−0,011	−4,000	−0,120	−0,030
0,8	−0,011	−5,800	−0,169	−0,040	−0,012	−5,420	−0,183	−0,040
1,0	−0,002	−7,260	−0,309	−0,050	−0,008	−6,850	−0,061	−0,050
1,2	−0,004	−8,770	−0,122	−0,060	0,000	−8,330	−0,104	−0,050
1,4	−0,011	−10,330	−0,140	−0,073	−0,003	−9,830	−0,143	−0,065
1,6	−0,017	−11,930	−0,188	−0,087	−0,007	−11,340	−0,189	−0,076
1,8	−0,023	−13,550	−0,238	−0,099	−0,008	−12,850	−0,237	−0,087
2,0	−0,025	−15,210	−0,290	−0,110	−0,011	−14,360	−0,284	−0,099
2,2	−0,029	−16,850	−0,345	−0,124	−0,011	−15,870	−0,333	−0,111
2,4	−0,031	−18,480	−0,395	−0,135	−0,011	−17,340	−0,381	−0,118
2,6	−0,031	−20,070	−0,448	−0,139	−0,011	−18,780	−0,428	−0,120
2,8	−0,027	−21,579	−0,496	−0,099	−0,039	−20,160	−0,472	−0,036
3,0	−0,067	−22,974	−0,540	−0,061	−2,073	−21,490	−0,511	−0,047
3,2	−2,071	−24,216	−0,583	−0,056	−4,052	−22,731	−0,548	−0,051
3,4	−3,885	−25,263	−0,621	−0,056	−6,033	−23,874	−0,586	−0,058
3,6	−5,682	−26,141	−0,659	−0,065	−8,052	−24,932	−0,625	−0,064
3,8	−6,447	−26,102	−0,700	−0,072	−8,892	−25,227	−0,663	−0,069
4,0	−5,065	−24,232	−0,737	−0,080	−7,135	−23,743	−0,695	−0,076



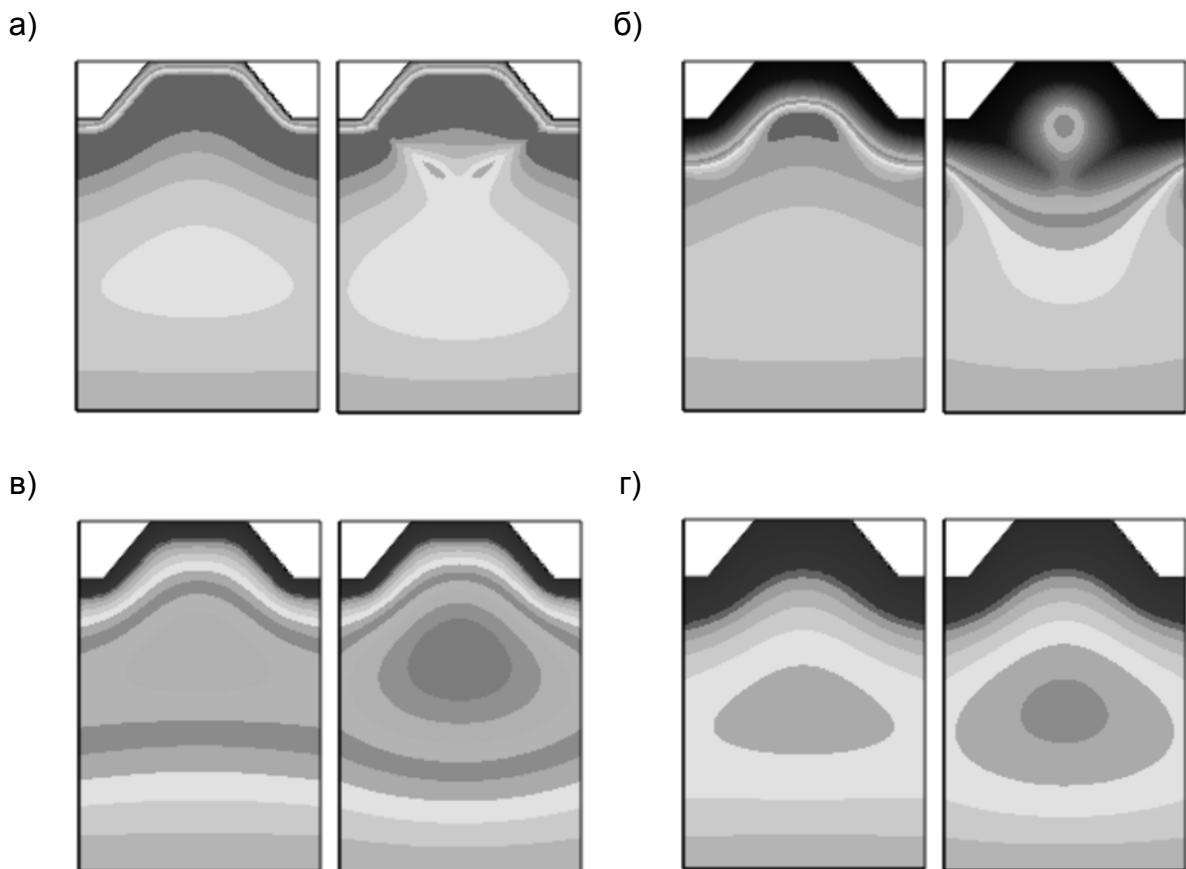
В таблице 5.2 приведены величины дополнительного промораживания грунта термостабилизаторами 4C0, используемыми при горизонтальной поверхности грунтового массива. Можно видеть, что большие скорости ветра в течение среднестатистического года, наблюдаемые на территории Сого-Хая, приводят к более высоким темпам промораживания при наличии рабочего цикла термостабилизатора, и также к более высоким темпам последующего выноса накопленного холода из грунта; остаточный эффект для обеих рассмотренных территорий оказывается практически одинаковым. В то же время для грунта G450 (табл. 5.2) остаточный эффект (на 1 сентября) заметно выше, чем для грунта G120 (табл. 5.1), что свидетельствует о повышенной эффективности использования термостабилизаторов во влажных грунтах.

Таблица 5.2

Сравнительная эффективность использования СОУ типа 4C0 для третьей территориальной группы (модель климат-грунт C22-G450)

Глубина, м	Изменение температуры грунта при использовании СОУ, °С							
	Якутск				Сого-Хая			
	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября
0,2	-0,001	-2,920	-0,001	-0,020	-0,030	-2,140	-0,320	-0,060
0,4	-0,019	-5,130	-0,030	-0,020	-0,050	-4,430	-0,571	-0,120
0,6	-0,012	-7,300	-0,048	-0,030	-0,044	-6,680	-0,551	-0,194
0,8	0,000	-9,400	-0,148	-0,042	-0,002	-8,870	-0,307	-0,276
1,0	0,000	-11,410	-0,300	-0,053	0,000	-10,970	-0,314	-0,363
1,2	0,000	-13,330	-0,439	-0,066	0,000	-12,970	-0,431	-0,458
1,4	-0,001	-15,110	-0,585	-0,075	-0,004	-14,850	-0,562	-0,563
1,6	-0,021	-16,760	-0,715	-0,084	-0,053	-16,600	-0,686	-0,667
1,8	-0,084	-18,200	-0,832	-0,107	-0,153	-18,190	-0,800	-0,225
2,0	-0,147	-19,422	-0,944	-0,140	-0,257	-19,570	-0,911	-0,178
2,2	-0,255	-20,441	-1,065	-0,172	-0,477	-20,745	-1,025	-0,179
2,4	-0,449	-21,189	-1,180	-0,197	-0,853	-21,720	-1,128	-0,194
2,6	-0,726	-21,673	-1,285	-0,218	-1,313	-22,458	-1,226	-0,211
2,8	-1,077	-21,925	-1,379	-0,237	-1,808	-22,942	-1,320	-0,234
3,0	-1,472	-21,831	-1,470	-0,263	-2,271	-23,199	-1,400	-0,260
3,2	-1,852	-21,449	-1,550	-0,288	-2,697	-23,204	-1,470	-0,285
3,4	-2,175	-20,823	-1,630	-0,311	-3,065	-22,944	-1,540	-0,307
3,6	-2,415	-19,967	-1,690	-0,332	-3,330	-22,381	-1,610	-0,327
3,8	-2,510	-18,858	-1,750	-0,348	-3,415	-21,455	-1,660	-0,342
4,0	-2,401	-17,448	-1,800	-0,363	-3,244	-20,120	-1,720	-0,356

В условиях более высоких температур воздуха в течение среднестатистического года цикл формирования и последующего разрушения ядра холода завершается сохранением более массивной промороженной области. На рисунке 5.7 можно видеть, что в климатических условиях Чары (четвертая территориальная группа) остаточное ядро холода содержит центральную, более низкотемпературную часть, чем это имеет место при отсутствии СОУ (рис. 5.7г). Такого явления не наблюдается для объектов третьей территориальной группы (рис. 5.4г). Соответственно, в условиях более теплого базового климата ожидается повышенная эффективность использования термостабилизаторов и более значительное понижение климатического риска.



*Рис. 5.7. Влияние термостабилизаторов на температурный режим грунтов в климатических условиях Чары (климатическая модель С22, модель грунта G450), слева – отсутствие СОУ, справа – СОУ типа 1C0: а) – 1 ноября, б) – 1 января, в) – 1 июня, г) – 1 сентября*

На рисунке 5.8 показано использование термостабилизаторов в грунтовом массиве с горизонтальной поверхностью. Можно видеть, что процесс накопления холода в зимний период (рис. 5.8б) идет менее интенсивно, чем в климатических условиях третьей территориальной группы (рис. 5.5б). Однако и разрушение ядра холода с ростом температур атмосферного воздуха также идет более медленными темпами (рис. 5.5в и рис. 5.8в), что в итоге приводит к сохранению промороженной области в больших размерах (рис. 5.5г и рис. 5.8г). Соответственно, для объектов транспортной инфраструктуры четвертой территориальной группы, основания которых размещаются в однородном по форме грунтовом массиве, также ожидается большее снижение климатических рисков по сравнению с третьей группой.

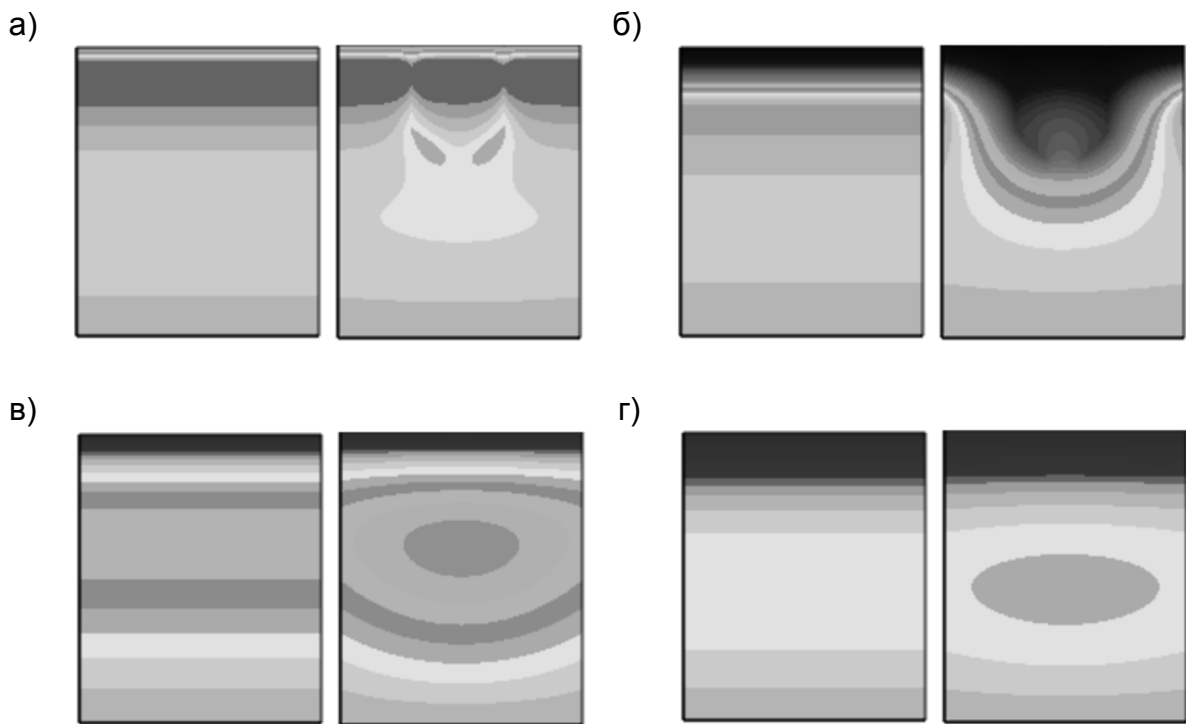
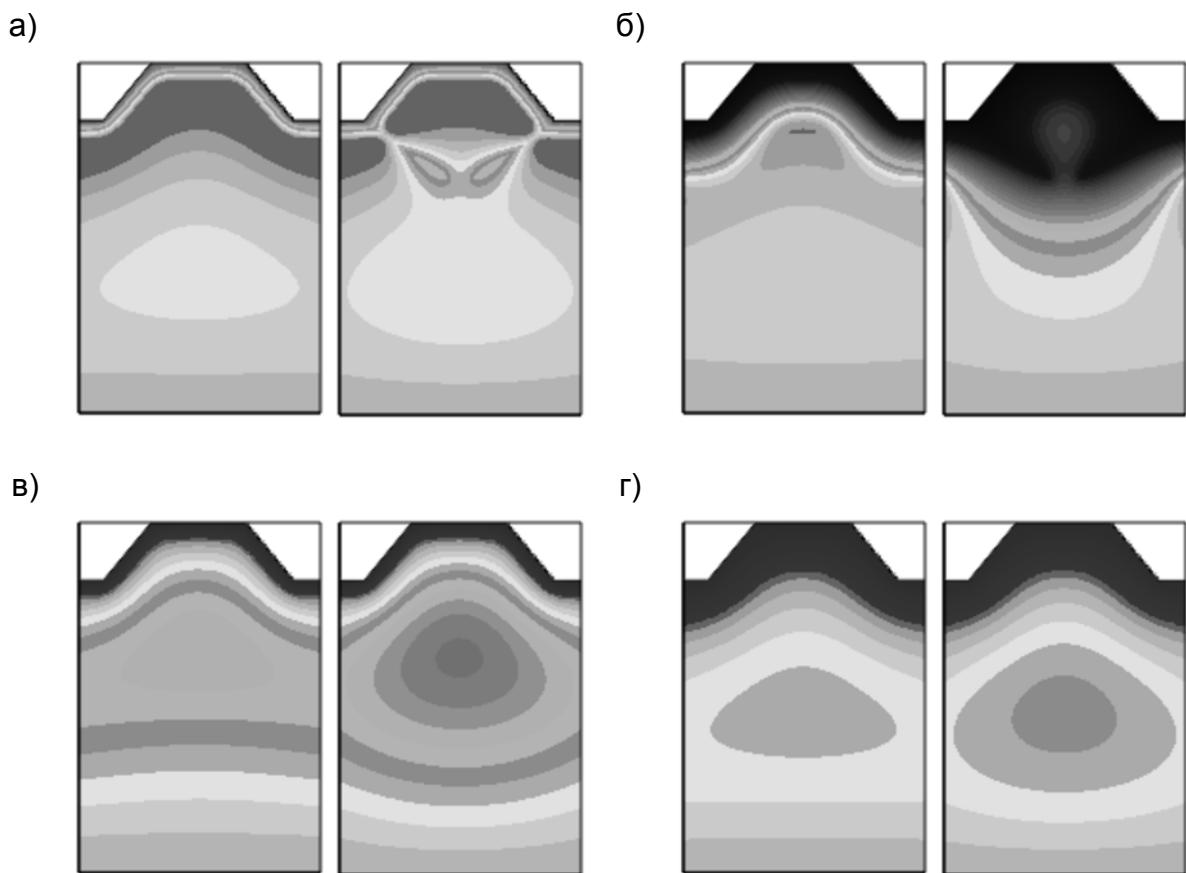


Рис. 5.8. Влияние термостабилизаторов на температурный режим грунтов в климатических условиях Чары (климатическая модель С22, модель грунта G450), слева – отсутствие СОУ, справа – СОУ типа 4C0: а) – 1 ноября, б) – 1 января, в) – 1 июня, г) – 1 сентября

В пределах одной территориальной группы различие в годовой температурной динамике вечномёрзлого грунта незначительно. На рисунке 5.9 можно видеть, что в климатических условиях Нагорного

(отличающегося близкими, по сравнению с Чарой, значениями температур воздуха, но значительно более сильными ветрами) несколько быстрее формируется ядро холода, что связано с повышением мощности термостабилизатора при наличии его рабочего цикла. В последующем повышенная скорость ветра в весенний и летний периоды способствует ускоренному разрушению промороженной области, и ее конечное состояние (соответствующее максимальной осадке дорожного профиля, рис. 5.9г) весьма близко к остаточному состоянию ядра холода на территории Чары (рис. 5.7г).



*Рис. 5.9. Влияние термостабилизаторов на температурный режим грунтов в климатических условиях Нагорного (климатическая модель С22, модель грунта G450), слева – отсутствие СО<sub>2</sub>, справа – СО<sub>2</sub> типа 1C0:  
а) – 1 ноября, б) – 1 января, в) – 1 июня, г) – 1 сентября*

Близкие значения итоговых температур грунтового массива для объектов одной территориальной группы получены и в случае песчаных грунтов (табл. 5.3). При более высоких средних скоростях ветра

(Нагорный) общая сумма накопленных дополнительных отрицательных температур к 1 января превышает аналогичную сумму для Чары на 45%, а уже к 1 июня эти суммы становятся одинаковыми, несколько различаясь только ее распределением по вертикальному профилю. Равенство сумм отрицательных температур сохраняется и до 1 сентября (для Нагорного она лишь на 3% превышает значения для Чары). Это означает практически одинаковую эффективность использования термостабилизаторов, независимо от динамики скорости ветра в течение года.

Таблица 5.3

Сравнительная эффективность использования СОУ типа 1С0 для четвертой территориальной группы (модель климат-грунт С22-G135)

Глубина , м	Изменение температуры грунта при использовании СОУ, °С							
	Чара				Нагорный			
	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября
0,2	-0,002	-1,080	-0,060	-0,030	-0,010	-1,360	-0,040	-0,020
0,4	-0,002	-1,770	-0,171	-0,040	-0,005	-2,830	-0,052	-0,030
0,6	-0,001	-2,560	-0,390	-0,060	-0,023	-4,370	-0,035	-0,056
0,8	-0,001	-3,490	-0,153	-0,079	0,000	-5,980	-0,054	-0,074
1,0	-0,003	-4,570	-0,142	-0,097	-0,001	-7,680	-0,148	-0,094
1,2	-0,003	-5,850	-0,213	-0,118	-0,001	-9,480	-0,234	-0,116
1,4	-0,004	-7,350	-0,291	-0,142	-0,001	-11,360	-0,317	-0,137
1,6	-0,004	-9,090	-0,372	-0,159	-0,001	-13,296	-0,400	-0,164
1,8	-0,004	-11,071	-0,451	-0,158	-0,001	-15,249	-0,481	-0,190
2,0	-0,003	-13,339	-0,531	-0,088	0,000	-17,100	-0,562	-0,034
2,2	-0,004	-14,627	-0,611	-0,044	-0,043	-18,723	-0,647	-0,057
2,4	-0,115	-14,139	-0,692	-0,063	-0,503	-19,914	-0,730	-0,070
2,6	-0,370	-13,862	-0,770	-0,080	-1,136	-20,525	-0,808	-0,088
2,8	-0,765	-13,781	-0,842	-0,097	-1,918	-20,728	-0,883	-0,109
3,0	-1,270	-13,879	-0,911	-0,119	-2,839	-20,870	-0,952	-0,132
3,2	-1,873	-14,140	-0,973	-0,139	-3,861	-21,052	-1,017	-0,153
3,4	-2,523	-14,520	-1,032	-0,159	-4,914	-21,277	-1,077	-0,173
3,6	-3,212	-15,001	-1,084	-0,177	-5,994	-21,541	-1,131	-0,194
3,8	-3,498	-14,854	-1,131	-0,198	-6,402	-21,133	-1,184	-0,215
4,0	-2,735	-13,121	-1,175	-0,215	-5,151	-19,090	-1,229	-0,234

Более высокую эффективность СОУ в климатических условиях четвертой территориальной группы (по сравнению с третьей группой)

можно увидеть в табл. 5.4. Сумма накопленных разностей температур в грунте (за счет использования термостабилизаторов) к моменту минимальной несущей способности грунтов для территории Нагорного на 25% выше, чем для территории Якутска (табл. 5.2), а для Чары это превышение составляет 85%.

Таблица 5.4

Сравнительная эффективность использования СОУ типа 4С0 для четвертой территориальной группы (модель климат-грунт С22-G450)

Глубина, м	Изменение температуры грунта при использовании СОУ, °С							
	Чара				Нагорный			
	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября	1 ноября	1 января	1 июня	1 сентября
0,2	−0,006	−2,960	−0,120	−0,080	−0,020	−2,010	−0,020	−0,020
0,4	−0,008	−4,620	−0,195	−0,150	−0,021	−4,140	−0,045	−0,030
0,6	−0,001	−6,270	−0,201	−0,222	−0,011	−6,230	−0,067	−0,045
0,8	0,000	−7,860	−0,285	−0,300	0,000	−8,270	−0,229	−0,057
1,0	0,000	−9,410	−0,384	−0,383	0,000	−10,240	−0,389	−0,069
1,2	0,000	−10,850	−0,499	−0,464	0,000	−12,100	−0,537	−0,081
1,4	−0,003	−12,174	−0,629	−0,554	−0,008	−13,820	−0,693	−0,093
1,6	−0,033	−13,330	−0,782	−0,639	−0,065	−15,376	−0,852	−0,104
1,8	−0,079	−14,302	−0,920	−0,222	−0,135	−16,756	−0,999	−0,140
2,0	−0,113	−14,857	−1,043	−0,193	−0,190	−17,906	−1,129	−0,181
2,2	−0,158	−14,760	−1,152	−0,187	−0,291	−18,822	−1,244	−0,207
2,4	−0,222	−14,135	−1,247	−0,213	−0,461	−19,358	−1,346	−0,241
2,6	−0,322	−13,390	−1,333	−0,238	−0,729	−19,483	−1,446	−0,267
2,8	−0,458	−12,709	−1,417	−0,265	−1,064	−19,233	−1,545	−0,297
3,0	−0,619	−12,134	−1,499	−0,292	−1,438	−18,778	−1,638	−0,323
3,2	−0,804	−11,642	−1,576	−0,313	−1,827	−18,266	−1,729	−0,348
3,4	−0,989	−11,163	−1,648	−0,335	−2,158	−17,664	−1,809	−0,377
3,6	−1,162	−10,655	−1,712	−0,368	−2,400	−16,956	−1,883	−0,415
3,8	−1,254	−10,030	−1,767	−0,401	−2,498	−16,038	−1,945	−0,453
4,0	−1,227	−9,229	−1,812	−0,432	−2,396	−14,852	−1,997	−0,485

### 5.3. Влияние природно-климатических и конструктивных факторов на величину снижения климатических рисков

При повышении контрастности климата риски в отношении *автомобильного и железнодорожного профилей* прогнозируются на невысоком уровне, что не вызывает реальной необходимости их снижения

с помощью СОУ. В таблице 5.5 показаны результаты возможного использования термостабилизаторов для этого вида объектов; во всех рассмотренных случаях уровень риска не понизился (остался на низком уровне), а максимально зафиксированное его снижение составило 91 единицы (около 40%). Можно отметить тенденцию к повышению эффективности СОУ для объектов территориальных групп, отличающихся более высокими температурами воздуха в течение среднестатистического года.

Таблица 5.5

Снижение климатических рисков для автодорожного и железнодорожного профилей в условиях повышения контрастности климата (модель C02)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1.	2-я	Сусуман	G450	229	1C0	172	–57	–24,9
2.	3-я	Якутск	G450	235	1C0	191	–44	–18,7
3.	5-я	Уренгой	G450	201	1C0	151	–50	–24,9
4.	6-я	Северо-Енисейский	G450	228	1C0	137	–91	–39,9

*Свайное основание* в условиях повышения контрастности климата также отличается низкими уровнями прогнозируемых рисков, однако эффективность использования термостабилизаторов оказывается значительно выше. Это связано с расположением области грунта, тепловое состояние которой влияет на климатические риски. При отсутствии практической необходимости в использовании СОУ в табл. 5.6 можно увидеть, что применение термостабилизаторов для защиты свайных оснований теоретически позволяет уменьшить уровень риска с низкого до незначительного, а при грунтах высокой влажности свести его к нулю (10-12 строки табл. 5.6). В грунтах низкой влажности, особенно в песчаных, эффект от использования термостабилизаторов незначителен и не превышает 14% (строки 1-3 табл. 5.6).

Таблица 5.6

Снижение климатических рисков для свайного основания в условиях повышения контрастности климата (модель C02)

№ п/п	Территори- альная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без COУ	При использовании COУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1.	2-я	Сусуман	G120	174	3A0	165	–9	–5,2
2.					3B0	159	–15	–8,6
3.					3C0	150	–24	–13,8
4.			G135	125	3A0	88	–37	–29,6
5.					3B0	67	–58	–46,4
6.					3C0	53	–72	–57,6
7.	7-я	Келлог	G430	143	3A0	55	–88	–61,5
8.					3B0	21	–122	–85,3
9.					3C0	7	–136	–95,1
10.			G450	71	3A0	0	–71	–100,0
11.					3B0	0	–71	–100,0
12.					3C0	0	–71	–100,0

Наиболее уязвимые к климатическим изменениям *ленточные и столбчатые фундаменты* могут быть достаточно эффективно защищены с помощью COУ даже в песчаных маловлажных грунтах. Для всех трех рассмотренных в табл. 5.7 территорий возможно снижение климатического риска на 1-2 уровня. Наиболее эффективным из рассмотренных является термостабилизатор 1C0, при использовании которого снижение климатического риска прогнозируется от 210 до 494 единиц. При общей достаточно высокой эффективности COУ она заметно зависит от конкретных климатических условий на территории (для типа 1C0 снижение риска варьируется от 24,3% до 87,3%), что свидетельствует о необходимости рассмотрения значительного количества различных конструктивных вариантов термостабилизатора с целью выбора наиболее эффективного.



Таблица 5.7

Снижение климатических рисков для ленточного и столбчатого фундаментов в условиях повышения контрастности климата  
(модель C02)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1.	2-я	Усть-Омчуг	G120	566	4A0	86	–480	–84,8
2.					4B0	80	–486	–85,9
3.					4C0	72	–494	–87,3
4.	4-я	Могоча	G120	863	4A0	704	–159	–18,4
5.					4B0	672	–191	–22,1
6.					4C0	653	–210	–24,3
7.	6-я	Северо-Енисейский	G120	690	4A0	456	–234	–33,9
8.					4B0	432	–258	–37,4
9.					4C0	428	–262	–38,0

Потепление климата, также не вызывает насущной необходимости его снижения. В отношении *автодорожного и железнодорожного профилей* возможная эффективность СОУ при этом виде климатических изменений несколько ниже, чем в случае повышения контрастности (табл. 5.8); это объясняется более теплым зимним периодом и пониженной в этих условиях мощностью СОУ.

Таблица 5.8

Снижение климатических рисков для автодорожного и железнодорожного профилей в условиях потепления климата  
(модель C20)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1.	2-я	Сусуман	G450	273	1C0	235	–38	–13,9
2.	3-я	Якутск	G450	266	1C0	253	–13	–4,9
3.	5-я	Уренгой	G450	289	1C0	210	–79	–27,3
4.	6-я	Северо-Енисейский	G450	313	1C0	244	–69	–22,0

Сравнение таблицы 5.8 с таблицей 5.5 подтверждает вышеуказанную закономерность (с исключением для климатических условий Уренгоя, где эффективность несущественно возрастает – с 24,9% до 27,3%).

Потепление климата существенно повышает риски в отношении *свайного основания*. По мере повышения среднегодовой температуры воздуха на территории растут как количественные значения климатических рисков, так и возможная эффективность использования СОУ (табл. 5.9). В условиях восьмой территориальной группы зафиксировано снижение риска на 590 единиц (строка 24), что является очень значительной величиной. Вместе с тем в условиях пониженных температур воздуха эффективность использования СОУ существенно понижается (для второй территориальной группы даже при высокой влажности грунта снижение риска не превышает 90 единиц, а для сухих песков ограничено значением 25 единиц).

Таблица 5.9

Снижение климатических рисков для свайного основания в условиях потепления климата (модель С20)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	2-я	Ягодный	G120	419	3A0	408	–11	–2,6
2.					3B0	401	–18	–4,3
3.					3C0	394	–25	–6,0
4.			G135	326	3A0	305	–21	–6,4
5.					3B0	290	–36	–11,0
6.					3C0	276	–50	–15,3
7.			G430	362	3A0	336	–26	–7,2
8.					3B0	316	–46	–12,7
9.					3C0	297	–65	–18,0
10.			G450	322	3A0	287	–35	–10,9
11.					3B0	258	–64	–19,9
12.					3C0	232	–90	–28,0

Окончание табл. 5.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13.	4-я	Нижнеангарск	G120	688	3A0	617	-71	-10,3
14.					3B0	590	-98	-14,2
15.					3C0	568	-120	-17,4
16.			G430	548	3A0	420	-128	-23,4
17.					3B0	358	-190	-34,7
18.					3C0	304	-244	-44,5
19.	8-я	Териберка	G120	923	3A0	612	-311	-33,7
20.					3B0	479	-444	-48,1
21.					3C0	417	-506	-54,8
22.			G135	878	3A0	455	-423	-48,2
23.					3B0	348	-530	-60,4
24.					3C0	288	-590	-67,2
25.			G430	874	3A0	642	-232	-26,5
26.					3B0	498	-376	-43,0
27.					3C0	436	-438	-50,1
28.			G450	800	3A0	485	-315	-39,4
29.					3B0	412	-388	-48,5
30.					3C0	347	-453	-56,6

*Ленточные и столбчатые фундаменты* и в условиях потепления могут быть эффективно защищены с помощью СОУ, что так же, как и при повышении контрастности, требует максимально точного соответствия конструкции термостабилизатора конкретным климатическим и грунтовым условиям. При соблюдении этого условия снижение риска может превысить 600 единиц (табл. 5.10, строки 7-9). В противном же случае эффективность СОУ может оказаться неоправданно низкой (строки 4-6 табл. 5.10, в которых показано снижение риска для Якутска на уровне 40 единиц). Типичное снижение риска для данного вида объектов при использовании СОУ составляет 200-400 единиц.

Таблица 5.10

**Снижение климатических рисков для ленточного и столбчатого  
фундаментов в условиях потепления климата (модель С20)**

№ п/п	Террито- риальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1.	1-я	Депутатский	G120	577	4A0	289	–288	–49,9
2.					4B0	282	–295	–51,1
3.					4C0	270	–307	–53,2
4.	3-я	Якутск	G120	846	4A0	809	–37	–4,4
5.					4B0	806	–40	–4,7
6.					4C0	802	–44	–5,2
7.			G135	691	4A0	73	–618	–89,4
8.					4B0	68	–623	–90,2
9.					4C0	67	–624	–90,3
10.			G430	837	4A0	645	–192	–22,9
11.					4B0	609	–228	–27,2
12.					4C0	601	–236	–28,2
13.			G450	599	4A0	51	–548	–91,5
14.					4B0	36	–563	–94,0
15.					4C0	27	–572	–95,5
16.	4-я	Могоча	G120	1000	4A0	877	–123	–12,3
17.					4B0	863	–137	–13,7
18.					4C0	847	–153	–15,3
19.			G430	832	4A0	676	–156	–18,8
20.					4B0	628	–204	–24,5
21.					4C0	614	–218	–26,2
22.	8-я	Териберка	G120	1000	4A0	782	–218	–21,8
23.					4B0	761	–239	–23,9
24.					4C0	755	–245	–24,5
25.			G135	1000	4A0	609	–391	–39,1
26.					4B0	594	–406	–40,6
27.					4C0	578	–422	–42,2
28.			G430	1000	4A0	748	–252	–25,2
29.					4B0	720	–280	–28,0
30.					4C0	720	–280	–28,0

Сочетание потепления и повышения контрастности климата является наиболее опасным из рассмотренных сценариев для вели-

чины прогнозируемых рисков. Для *автодорожного и железнодорожного профилей* климатический риск приближается, а в отдельных случаях и достигает опасного уровня, что делает необходимым его своевременное снижение. Эффективность использования термостабилизаторов при этом зависит от величины риска и повышается по мере ее перехода на более высокие уровни (табл. 5.11). В условиях низкого риска возможная величина его снижения не превышает 23 единицы; для среднего уровня риска максимальное полученное значение составляет 77 единиц; в климатических условиях высоко-температурной редкоостровной мерзлоты снижение риска высокого уровня может составлять до 219 единиц.

Таблица 5.11

Снижение климатических рисков для автодорожного и железнодорожного профилей в условиях одновременного потепления и повышения контрастности климата (модель С22)

№ п/п	Территори- альная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без CO <sub>2</sub>	При использовании CO <sub>2</sub>			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	2-я	Усть-Омчуг	G430	396	1A0	387	-9	-2,3
2.					1B0	373	-23	-5,8
3.					1C0	360	-36	-9,1
4.			G450	470	1A0	441	-29	-6,2
5.					1B0	419	-51	-10,9
6.					1C0	410	-60	-12,8
7.	3-я	Сого-Хая	G120	156	1A0	149	-7	-4,5
8.					1B0	145	-11	-7,1
9.					1C0	143	-13	-8,3
10.			G135	242	1A0	235	-7	-2,9
11.					1B0	228	-14	-5,8
12.					1C0	228	-14	-5,8
13.			G430	314	1A0	294	-20	-6,4
14.					1B0	279	-35	-11,1
15.					1C0	278	-36	-11,5
16.			G450	452	1A0	432	-20	-4,4
17.					1B0	414	-38	-8,4
18.					1C0	401	-51	-11,3

Продолжение табл. 5.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
19.	3-я	Якутск	G120	170	1A0	166	–4	–2,4
20.					1B0	162	–8	–4,7
21.					1C0	158	–12	–7,1
22.			G135	228	1A0	223	–5	–2,2
23.					1B0	215	–13	–5,7
24.					1C0	215	–13	–5,7
25.			G430	327	1A0	316	–11	–3,4
26.					1B0	296	–31	–9,5
27.					1C0	278	–49	–15,0
28.			G450	476	1A0	448	–28	–5,9
29.					1B0	433	–43	–9,0
30.					1C0	407	–69	–14,5
31.	4-я	Нагорный	G120	205	1A0	199	–6	–2,9
32.					1B0	194	–11	–5,4
33.					1C0	194	–11	–5,4
34.			G135	248	1A0	237	–11	–4,4
35.					1B0	229	–19	–7,7
36.					1C0	225	–23	–9,3
37.			G430	381	1A0	366	–15	–3,9
38.					1B0	351	–30	–7,9
39.					1C0	334	–47	–12,3
40.			G450	514	1A0	504	–10	–1,9
41.					1B0	481	–33	–6,4
42.					1C0	454	–60	–11,7
43.		Чара	G135	245	1A0	233	–12	–4,9
44.					1B0	226	–19	–7,8
45.					1C0	212	–33	–13,5
46.			G450	504	1A0	479	–25	–5,0
47.					1B0	442	–62	–12,3
48.					1C0	434	–70	–13,9
49.	5-я	Уренгой	G430	398	1A0	362	–36	–9,0
50.					1B0	342	–56	–14,1
51.					1C0	336	–62	–15,6
52.			G450	466	1A0	466	0	0,0
53.					1B0	448	–18	–3,9
54.					1C0	423	–43	–9,2
55.	7-я	Келлог	G430	372	1A0	361	–11	–3,0
56.					1B0	331	–41	–11,0
57.					1C0	314	–58	–15,6

Окончание табл. 5.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
58.	7-я	Келлог	G450	495	1A0	483	–12	–2,4
59.					1B0	438	–57	–11,5
60.					1C0	418	–77	–15,6
61.	8-я	Пялица	G450	739	1A0	590	–149	–20,2
62.					1B0	530	–209	–28,3
63.					1C0	520	–219	–29,6

Аэродромное покрытие отличается несколько меньшими уровнями риска, что обусловлено отсутствием дополнительного протаивания грунта по наклонным боковым поверхностям, характерным для автодорожного и железнодорожного профилей. В таблице 5.12 можно видеть такую же зависимость эффективности использования термостабилизаторов от уровня снижаемого риска: величина снижения растет от 50-60 единиц при низком и среднем уровне риска до 214 при высоком уровне. Необходимо отметить, что размещение СОУ на плоскости аэродромного покрытия не всегда возможно, поскольку ограничивает свободное пространство, как минимум, в одном направлении.

Таблица 5.12

Снижение климатических рисков для аэродромного покрытия в условиях одновременного потепления и повышения контрастности климата (модель С22)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
1	2	3	4	5	6	7	Абс. ед.	%
1.	2-я	Усть-Омчуг	G430	317	2A0	317	0	0,0
2.					2B0	317	0	0,0
3.					2C0	317	0	0,0
4.			G450	510	2A0	451	–59	–11,6
5.					2B0	451	–59	–11,6
6.					2C0	451	–59	–11,6

Окончание табл. 5.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7.	5-я	Уренгой	G430	304	2A0	304	0	0,0
8.					2B0	250	-54	-17,8
9.					2C0	250	-54	-17,8
10.			G450	442	2A0	442	0	0,0
11.					2B0	442	0	0,0
12.					2C0	404	-38	-8,6
13.	8-я	Пялица	G120	263	2A0	229	-34	-12,9
14.					2B0	229	-34	-12,9
15.					2C0	213	-50	-19,0
16.			G450	602	2A0	477	-125	-20,8
17.					2B0	388	-214	-35,5
18.					2C0	388	-214	-35,5

Ожидаемое снижение климатического риска для *свайного основания* (табл. 5.13) несколько ниже, чем при двух ранее рассмотренных сценариях климатических изменений. В условиях повышения контрастности климата снижение рисков более чем на 50% являлось нормой (табл. 5.6, строки 6-12), при потеплении такая величина снижения прогнозировалась только в отдельных случаях для объектов восьмой территориальной группы (табл. 5.9, строки 21, 23-24, 27, 30). В таблице 5.13 зафиксировано всего два таких случая, также только для восьмой территориальной группы (строки 39 и 42).

Таблица 5.13

Снижение климатических рисков для свайного основания в условиях одновременного потепления и повышения контрастности климата (модель C22)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	1-я	Депутатский	G120	437	3A0	429	-8	-1,8
2.					3B0	421	-16	-3,7
3.					3C0	417	-20	-4,6



Окончание табл. 5.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4.	1-я	Депутатский	G135	378	3A0	354	–24	–6,3
5.					3B0	344	–34	–9,0
6.					3C0	336	–42	–11,1
7.	3-я	Сого-Хая	G120	455	3A0	444	–11	–2,4
8.					3B0	440	–15	–3,3
9.					3C0	437	–18	–4,0
10.			G135	366	3A0	355	–11	–3,0
11.					3B0	344	–22	–6,0
12.					3C0	333	–33	–9,0
13.			G430	456	3A0	436	–20	–4,4
14.					3B0	424	–32	–7,0
15.					3C0	407	–49	–10,7
16.			G450	344	3A0	310	–34	–9,9
17.					3B0	288	–56	–16,3
18.					3C0	262	–82	–23,8
19.		Якутск	G120	482	3A0	467	–15	–3,1
20.					3B0	457	–25	–5,2
21.					3C0	448	–34	–7,1
22.			G135	428	3A0	411	–17	–4,0
23.					3B0	390	–38	–8,9
24.					3C0	371	–57	–13,3
25.			G430	442	3A0	417	–25	–5,7
26.					3B0	401	–41	–9,3
27.					3C0	384	–58	–13,1
28.			G450	391	3A0	356	–35	–9,0
29.					3B0	330	–61	–15,6
30.					3C0	296	–95	–24,3
31.	4-я	Нижнеангарск	G120	766	3A0	724	–42	–5,5
32.					3B0	707	–59	–7,7
33.					3C0	692	–74	–9,7
34.	8-я	Терско-Орловский	G120	879	3A0	714	–165	–18,8
35.					3B0	660	–219	–24,9
36.					3C0	613	–266	–30,3
37.			G135	854	3A0	566	–288	–33,7
38.					3B0	489	–365	–42,7
39.					3C0	423	–431	–50,5
40.			G430	836	3A0	619	–217	–26,0
41.					3B0	480	–356	–42,6
42.					3C0	352	–484	–57,9

Максимальная эффективность использования СОУ прогнозируется в отношении *ленточных и столбчатых фундаментов* (табл. 5.14). При грунтах высокой влажности возможно снижение величины климатических рисков более чем на 800 единиц (строки 71, 72); достаточно частым случаем является понижение риска на 600 единиц и более. В то же время сухие грунты, как и в остальных ранее рассмотренных случаях, существенно понижают эффективность использования термостабилизаторов.

Таблица 5.14

Снижение климатических рисков для ленточного и столбчатого фундаментов в условиях одновременного потепления и повышения контрастности климата (модель С22)

№ п/п	Территориальная группа	Пункт	Модель грунта	Климатические риски, промилле				
				Без СОУ	При использовании СОУ			
					Тип	Риск	Изменение	
							Абс. ед.	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	1-я	Среднеколымск	G120	909	4A0	727	-182	-20,0
2.					4B0	722	-187	-20,6
3.					4C0	721	-188	-20,7
4.			G135	690	4A0	168	-522	-75,7
5.					4B0	158	-532	-77,1
6.					4C0	147	-543	-78,7
7.			G430	835	4A0	594	-241	-28,9
8.					4B0	571	-264	-31,6
9.					4C0	552	-283	-33,9
10.			G450	781	4A0	213	-568	-72,7
11.					4B0	181	-600	-76,8
12.					4C0	167	-614	-78,6
13.	3-я	Сого-Хая	G120	936	4A0	882	-54	-5,8
14.					4B0	876	-60	-6,4
15.					4C0	871	-65	-6,9
16.			G135	885	4A0	448	-437	-49,4
17.					4B0	437	-448	-50,6
18.					4C0	430	-455	-51,4
19.			G430	862	4A0	806	-56	-6,5
20.					4B0	798	-64	-7,4
21.					4C0	796	-66	-7,7

Продолжение табл. 5.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
22.	3-я	Сого-Хая	G450	766	4A0	210	-556	-72,6
23.					4B0	180	-586	-76,5
24.					4C0	175	-591	-77,2
25.		Якутск	G120	1000	4A0	1000	0	0,0
26.					4B0	1000	0	0,0
27.					4C0	1000	0	0,0
28.			G135	882	4A0	386	-496	-56,2
29.					4B0	373	-509	-57,7
30.					4C0	364	-518	-58,7
31.			G430	926	4A0	856	-70	-7,6
32.					4B0	840	-86	-9,3
33.					4C0	837	-89	-9,6
34.			G450	792	4A0	185	-607	-76,6
35.					4B0	148	-644	-81,3
36.					4C0	132	-660	-83,3
37.	4-я	Нагорный	G120	1000	4A0	780	-220	-22,0
38.					4B0	773	-227	-22,7
39.					4C0	763	-237	-23,7
40.			G135	859	4A0	159	-700	-81,5
41.					4B0	142	-717	-83,5
42.					4C0	130	-729	-84,9
43.			G430	934	4A0	781	-153	-16,4
44.					4B0	759	-175	-18,7
45.					4C0	754	-180	-19,3
46.			G450	871	4A0	117	-754	-86,6
47.					4B0	91	-780	-89,6
48.					4C0	85	-786	-90,2
49.		Чара	G120	1000	4A0	1000	0	0,0
50.					4B0	987	-13	-1,3
51.					4C0	974	-26	-2,6
52.			G135	831	4A0	164	-667	-80,3
53.					4B0	150	-681	-81,9
54.					4C0	145	-686	-82,6
55.			G430	920	4A0	822	-98	-10,7
56.					4B0	799	-121	-13,2
57.					4C0	793	-127	-13,8
58.			G450	893	4A0	171	-722	-80,9
59.					4B0	145	-748	-83,8
60.					4C0	124	-769	-86,1

Окончание табл. 5.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
61.	5-я	Ныда	G120	928	4A0	720	–208	–22,4
62.					4B0	720	–208	–22,4
63.					4C0	720	–208	–22,4
64.			G135	826	4A0	76	–750	–90,8
65.					4B0	66	–760	–92,0
66.					4C0	65	–761	–92,1
67.			G430	922	4A0	711	–211	–22,9
68.					4B0	651	–271	–29,4
69.					4C0	639	–283	–30,7
70.			G450	859	4A0	73	–786	–91,5
71.					4B0	48	–811	–94,4
72.					4C0	39	–820	–95,5
73.	7-я	Келлог	G120	991	4A0	947	–44	–4,4
74.					4B0	936	–55	–5,5
75.					4C0	931	–60	–6,1
76.			G135	891	4A0	299	–592	–66,4
77.					4B0	245	–646	–72,5
78.					4C0	205	–686	–77,0
79.			G430	888	4A0	830	–58	–6,5
80.					4B0	811	–77	–8,7
81.					4C0	807	–81	–9,1
82.			G450	799	4A0	137	–662	–82,9
83.					4B0	117	–682	–85,4
84.					4C0	112	–687	–86,0

По итогам анализа влияния природно-климатических и конструктивных факторов на эффективность использования термостабилизаторов в целях снижения климатических рисков, можно сделать следующие выводы.

По мере повышения среднегодовой температуры воздуха (принимаемой в рамках определенного сценария климатических изменений) средняя мощность термостабилизатора в течение его рабочего цикла, а значит и эффективность использования СОУ для снижения

рисков, понижается вместе с повышением температуры воздуха в зимний период. Изменение контрастности климата слабо влияет на эффективность, поскольку повышенные темпы промораживания грунта зимой нивелируются столь же повышенными темпами его оттаивания в весенний и особенно в летний период.

Наибольшая эффективность термостабилизаторов отмечается в грунтах высокой влажности. Это связано со значительно более высокой теплоемкостью воды по сравнению с теплоемкостью сухого скелета грунта, а значит, с возможностью накопления в зимние периоды более массивных ядер холода, в значительной степени сохраняющихся в течение всего среднестатистического года. В грунтах низкой влажности, в особенности в сухих песках, термостабилизаторы, как правило, малоэффективны.

Эффективность применения термостабилизаторов существенно снижается, когда область грунта, температурное состояние которой влияет на климатические риски, расположена вблизи верхней границы грунтового массива. В этом случае практически невозможно сформировать достаточно мощное ядро холода, хотя бы частично сохраняющееся в течение летнего периода. Для объектов, в отношении которых риски определяются состоянием заглубленных областей грунта, использование термостабилизаторов, напротив, дает возможность существенного снижения климатических рисков.

Длина испарительной секции термостабилизатора не оказывает значимого влияния на его эффективность. Основным конструктивным фактором, определяющим общую мощность и эффективность термостабилизатора, является конструкция и геометрические размеры радиаторной секции. Увеличение же длины испарительной секции, сопровождаемое распределением неизменной мощности теплоотвода по большему объему грунта, оказывает достаточно слабое влияние на изменение климатических рисков.

Эффективность использования термостабилизаторов для объектов одной территориальной группы, характеризующихся схожими температурными режимами атмосферного воздуха, оценивается на

примерно одинаковых уровнях. Различия в ветровом режиме территории (более высокие скорости ветра) приводят как к более быстрому формированию ядра холода в течение зимнего периода, так и к более интенсивному его разрушению в летний период. Для объектов разных территориальных групп эффективность применения термостабилизаторов несколько увеличивается с ростом среднегодовой температуры воздуха на территории.

Применительно к основным видам объектов транспортной инфраструктуры эффективность возможного использования термостабилизаторов для снижения климатических рисков (с учетом вышеизложенных особенностей) оценивается следующим образом.

- *Автодорожный и железнодорожный профили* – эффективность низкая или, в отдельных случаях, средняя; при этом величина ожидаемых климатических рисков для данного вида объектов также находится на относительно невысоком уровне и обычно не требует высокоэффективных мероприятий по снижению риска.
- *Аэродромное покрытие* – эффективность низкая, что сопровождается конструктивной невозможностью обеспечения свободного пространства в обоих горизонтальных направлениях при использовании выступающих из земли радиаторных секций термостабилизаторов.
- *Свайное основание мостов и иных сооружений* – эффективность средняя и высокая, увеличивающаяся с ростом длины погружаемой в грунт сваи.
- *Ленточный или столбчатый фундамент* – максимально высокая эффективность, особенно при расположении испарительной секции непосредственно в пределах грунтовой области под подошвой фундамента; но и при отсутствии такой возможности размещение термостабилизаторов вблизи границ этой области приводит к существенному снижению климатических рисков.

## Заключение

Критическими элементами объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) всех видов транспорта при оценке их работоспособности являются грунтовые основания участков автомобильных и железных дорог, аэродромов, а также фундаменты зданий и сооружений, находящихся в морских и речных портах.

В числе основных мер, рекомендуемых авторами для снижения климатических рисков объектов транспортной инфраструктуры, следующие:

- развитие методов прогнозирования гидрометеорологических процессов, в том числе направленных на совершенствование прогнозов, раннее предупреждение, специализированный мониторинг;
- совершенствование нормативов изыскания и проектирования: корректировка нормативных правовых актов и документов технического регулирования (существующие нормативные документы, регламентирующие строительство и эксплуатацию зданий и сооружений в районах распространения вечной мерзлоты, не учитывают изменения климата);
- экономические меры: макроэкономические – изменение структуры финансирования строительства и содержания ОТИ; мезоэкономические – затраты, связанные с планированием изменения транспортной инфраструктуры; микроэкономические – стимулирующие энергосбережение, энергоэффективность;
- инженерно-технические меры по предотвращению деформаций земляного полотна, грунтов оснований ОТИ;
- изменение номенклатуры продукции промышленности дорожно-строительных материалов (теплоизолирующие пенопластовые щиты повышенной прочности);
- разработка и внедрение инновационных конструкций объектов, технологий строительства и содержания автомобильных, железных дорог, взлетно-посадочных полос (ВПП) аэродромов, объектов портовой инфраструктуры.

В результате выполненных научных исследований было установлено, что климатические риски для автомобильного и железнодорожного профилей, аэродромных покрытий и свайных оснований мостов и иных транспортных сооружений, как правило, находятся на низком или даже незначительном уровнях по всей территории криолитозоны. Значительные риски, вплоть до очень высоких, прогнозируются только для относительно малозаглубленных ленточных или столбчатых фундаментов, в первую очередь расположенных в районах высокотемпературной мерзлоты.

Основной способ адаптации линейных сооружений к прогнозируемым изменениям – термостабилизация вечной мерзлоты с применением различных технических средств и инженерных решений. Это, прежде всего, устройство вентиляционных каналов в насыпях линейных сооружений, которое обеспечивает заметное охлаждение приповерхностного слоя насыпи, а также создает прослойку, изолирующую нижележащие слои от хорошо прогреваемой летом на солнце поверхности. Аналогом для точечных сооружений является обустройство вентилируемых подвалов и подполий, которые также широко применяются при городской застройке. Также эффективно внедрение конструкций дорожного покрытия на вечномерзлотных грунтах с теплоизолирующим слоем из пенопластовых плит «пеноплекс», имеющих разные типы заложения в насыпи автомобильной или железной дороги. Наиболее эффективным мероприятием является использование на ОТИ сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ) (термостабилизаторов грунтов) разных типов. Главной задачей, решаемой с использованием СОУ, является сохранение ядра холода, сформированного в зимний период среднестатистического года, к моменту максимального оттаивания грунта, когда его несущая способность наименьшая.

По результатам выполненных научных исследований применительно к основным видам объектов транспортной инфраструктуры



эффективность возможного использования СОУ для снижения климатических рисков ОТИ в зонах вечной мерзлоты оценивается следующим образом.

Автодорожный и железнодорожный профили – эффективность низкая или, в отдельных случаях, средняя; при этом величина ожидаемых климатических рисков для данного вида объектов также находится на относительно невысоком уровне и обычно не требует высокоэффективных мероприятий по снижению риска.

Аэродромное покрытие – эффективность низкая, что сопровождается конструктивной невозможностью обеспечения свободного пространства в обоих горизонтальных направлениях при использовании выступающих из земли радиаторных секций термостабилизаторов.

Свайное основание мостов и иных сооружений – эффективность средняя и высокая, увеличивающаяся с ростом длины погружаемой в грунт сваи.

Ленточный или столбчатый фундамент – максимально высокая эффективность, особенно при расположении испарительной секции непосредственно в пределах грунтовой области под подошвой фундамента, но и при отсутствии такой возможности размещение СОУ вблизи границ этой области приводит к существенному снижению климатических рисков.

Мероприятия по адаптации должны разрабатываться и внедряться в рамках отраслевого плана адаптации к изменениям климата в области транспорта во исполнение Распоряжения Правительства РФ от 25.12.2019 № 3183-р «Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года», для реализации которого должно быть предусмотрено бюджетное финансирование.

По нашим оценкам применение указанных выше мероприятий по адаптации объектов транспортной инфраструктуры к климатическим изменениям в криолитозоне увеличит стоимость строительства (реконструкции) не менее чем на 50%.

Сохранение нормативных значений технико-эксплуатационных показателей участков дорог, мостов, путепроводов (повышение их живучести) в случае таяния вечной мерзлоты позволит предотвратить их разрушение и необходимость восстановления. Данное обстоятельство следует учитывать при выполнении обоснований мер по адаптации.

Представляется, что на отраслевом уровне должна быть разработана и реализована развернутая долгосрочная программа действий и мер по адаптации объектов транспорта и транспортной инфраструктуры к возможным изменениям климата.

По нашему мнению, в Российской Федерации необходимо аккумулировать и выделять финансовые средства одновременно на декарбонизацию транспорта и на адаптацию объектов транспорта и транспортной инфраструктуры к изменению климата.

В случае адаптации ОТИ затраты на реализацию соответствующих мероприятий будут несравненно меньше и будут связаны **преимущественно с созданием сети мониторинга технико-эксплуатационного состояния и принятием превентивных мер по сохранению живучести конкретных критически важных объектов транспорта в случае вялотекущих процессов, например, потери устойчивости грунтов оснований в результате таяния вечной мерзлоты**, укрепления критических элементов ОТИ в случае возникновения ЧС природного характера. Приведенная в данной работе методика оценки рисков потери функциональных свойств объектов транспортной инфраструктуры по мнению авторов должна способствовать решению данной задачи.

### Список литературы

1. *Акимов, В.А.* Риски чрезвычайных ситуаций, обусловленных изменением климата / В.А. Акимов, Р.А. Дурнев, Ю.И. Соколов // В кн. Защита населения и территорий Российской Федерации в условиях изменения климата. – М.: Изд-во ВНИИ по проблемам ГО и ЧС МЧС России, 2016. – С. 271–304.
2. *Анисимов, О.А.* Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогнозирование и оценка неопределенности / О.А. Анисимов, М.А. Белолуцкая // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2003. – Т.19. – С. 21–38.
3. *Бабурин, В.Л.* Оценка уязвимости социально-экономического развития арктической территории России / В.Л. Бабурин, [и др.] // Вестник Московского ун-та. Серия 5: География. – 2016. – № 6. – С. 71-77.
4. *Борисов, А.И.* Влияние географических факторов на развитие автодорожной сети Якутии / А.И. Борисов // Известия Дагестанского гос. пед. ун-та. Естественные и точные науки. – 2018. – №4. – С. 48-52.
5. *Герасимов, А.И.* Усиление несущей способности ледовых переправ и болотистых дорог / А.И. Герасимов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2009. – №1. – С. 1–12.
6. *Груза, Г.В.* Вероятностная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Российской Федерации: температура воздуха / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2011. – Т. 24. – С. 43–70.
7. *Груза, Г.В.* Географические и сезонные особенности современного глобального потепления / Г.В. Груза, [и др.] // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2015. – № 2. – С. 41-62.
8. *Егорова, Т.П.* Влияние климатических изменений на функционирование транспортной системы в арктических районах Якутии / Т.П. Егорова // Материалы Пятого Всероссийского научного семинара «Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера - 2016». – Сыктывкар: Изд-во ООО «Коми республиканская типография», 2016. – С. 147–151.
9. *Израэль, Ю.А.* Предел предсказуемости и стратегический прогноз изменения климата / Ю.А. Израэль, Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2009. – Т. 22. – С. 7–26.
10. *Иноземцев, С.С.* Агрессивность эксплуатационных условий дорожно-климатических зон России / С.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – №3. – С. 22-26.
11. *Лахметкина, Н.Ю.* Развитие транспортных систем в цифровой повестке / Н.Ю. Лахметкина, И.В. Щелкунова, Д.А. Рогова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 4. – С. 114-120.

12. *Левин, Б.А.* Концепция геоинформатики транспорта / Б.А. Левин, А.С. Матвеев, И.Н. Розенберг // Мир транспорта. – 2011. – №5. – С. 4–7.
13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, части 1-6, выпуск 24. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 608 с.
14. *Некрич, А.С.* Анализ региональных техногенных рисков территории Чукотского полуострова в условиях промышленного освоения и изменения климата / А.С. Некрич // Перспективы науки. – 2013. – № 2(41). – С. 67–69.
15. *Нигаматова, О.И.* Системы управления состоянием мостовых сооружений / О.И. Нигаматова, И.Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – №3. – С. 117.
16. *Поморцев, О.А.* Изменение климата и инженерно-геологические проблемы на трассе «Колыма» в Южном Верхоянье / О.А. Поморцев, [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2013. – №12. – С. 70–75.
17. *Пшеничникова, Е.С.* К вопросу районирования зоны вечной мерзлоты / Е.С. Пшеничникова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – №2. – С. 15-18.
18. *Салыгин, В.И.* Влияние освоения нефтегазовых ресурсов Арктики на развитие транспортной системы региона / В.И. Салыгин, И.А. Гулиев, А.О. Хубаева // Вестник МГИМО. – 2015. – №4. – С. 27-35.
19. *Сваткова, Т.Г.* Принципы географической картографии и геоинформатика / Т.Г. Сваткова // Вестник Московского ун-та. Серия 5: География. – 2008. – №2. – С. 23-27.
20. *Серова, В.А.* Проблемы транспортной обеспеченности севера: социальный аспект / В.А. Серова // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2010. – № 32. – С. 66-71.
21. *Стручкова, Г.П.* Оценка безопасности состояния протяженных технических систем, проложенных в криолитозоне с использованием ГИС-приложений / Г.П. Стручкова, и др. // Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики. Труды Всероссийской конференции с международным участием. – Якутск: Изд. Северо-Восточного фед. ун-та им. М.К. Аммосова. – 2016. – С. 98-101.
22. *Тебекин, А.В.* Развитие логистики в северных и арктических регионах / А.В. Тебекин // Журнал исследований по управлению. – 2018. – № 10. – С. 55-63.
23. *Тимухина, Е.Н.* Функциональная надежность – теоретические основы и принципы расчета / Е.Н. Тимухина, Н.В. Кащеева // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2012. – №2. – С. 98-108.
24. *Трофименко, Ю.В.* Методика оценки риска утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней (вечной) мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями / Ю.В. Трофименко, А.Н. Якубович // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 5. – С. 27-37.

25. Трофименко, Ю.В. Методика прогнозирования рисков чрезвычайных ситуаций природного характера на сети автомобильных дорог / Ю.В. Трофименко, А.Н. Якубович // Безопасность в техносфере. – 2015. – № 2. – С. 73-82.
26. Трофименко, Ю.В. Риски природных катастроф на перспективной сети скоростных автомобильных дорог России / Ю.В. Трофименко, А.Н. Якубович // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 1. – С. 38-43.
27. Трофименко, Ю.В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 464 с.
28. Хлебникова, Е.И. Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс / Е.И. Хлебникова, Т.А. Дацюк, И.А. Салл // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – №574. – С. 125–178.
29. Хлебникова, Е.И. Оценка изменения климатических воздействий на экономическое развитие территории Российской Арктики в XXI веке / Е.И. Хлебникова, [и др.] // Метеорология и гидрогеология. – 2018. – № 6. – С. 5-19.
30. Чернавская, М.М. Изменение температуры воздуха в северных строительноклиматических районах России в XX-XXI веках / М.М. Чернавская, Е.А. Черенкова // Известия РАН. Серия географическая. – 2010 – № 3. – С. 61–68.
31. Чибряков, Я.Ю. Теоретические аспекты транспортной картографии / Я.Ю. Чибряков // Геодезия и картография. – 2018. – №2. – С. 48–58.
32. Шек, В.М. Алгоритмы объектно-ориентированной обработки масштабируемой информации / В.М. Шек, Т.А. Кувашкина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – №6. – С. 187-193.
33. Школьник, И.М. Моделирование региональных особенностей сезонноталого слоя в зоне вечной мерзлоты на территории Сибири / И.М. Школьник, [и др.] // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI, №2. – С. 52–59.
34. Якубович, А.Н. Использование геоинформационных технологий при анализе и прогнозировании экологического состояния территорий дорожной сети / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // В мире научных открытий. – 2015. – №6. – С. 52–63.
35. Якубович, А.Н. Геоинформационные технологии как средство оценки состояния и прогнозирования развития автотранспортной системы горнопромышленного региона / А.Н. Якубович, С.Н. Крикун // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 12, Т. 5. – С. 385–391.
36. Якубович, А.Н. Концептуальные основы моделирования самовосстановления экосистем Крайнего Северо-Востока России, нарушенных при сооружении временных автодорог / А.Н. Якубович, И.А. Якубович, В.И. Рассоха // Вестник Оренбургского гос. ун-та. – 2012. – №10. – С. 182-186.

37. *Якубович, А.Н.* Моделирование и оценка природных и техногенных рисков в автотранспортном комплексе: монография / А.Н. Якубович, Ю.В. Трофименко, И.А. Якубович. – М.: МАДИ, 2018. – 232 с.
38. *Якубович, А.Н.* Надежность элементов АТС, описываемых двухфакторной моделью / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Вестник Московского автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). – 2016. – №1. – С. 7-14.
39. *Якубович, А.Н.* Определение надежности автотранспортных систем и их элементов методами математического моделирования / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Грузовик. – 2016. – №7. – С. 39-44.
40. *Якубович, А.Н.* Оценка обеспеченности ведущей функции потока отказов / А.Н. Якубович, И.А. Якубович // Вестник Московского автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). – 2011. – №1. – С.16-21.
41. *Якубович, А.Н.* Применение цифрового виртуального анализатора звуковых сигналов в целях диагностики неисправностей агрегатов АТС / А.Н. Якубович // Грузовик. – 2015. – №1. – С. 22-23.
42. *Якубович, И.А.* Оценка экологического вреда растительным комплексам Магаданской области при формировании сети временных автодорог / И.А. Якубович, А.Н. Якубович // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №3. – С. 49-52.
43. *Якубович, И.А.* Потенциальные источники возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера / И.А. Якубович, Г.В. Ерофеев // Вестник Северо-Восточного гос. ун-та. – 2006. – №7-2. – С. 131-135.
44. *Якунин, И.Н.* Исследование влияния температуры окружающей среды на безопасность автотранспортного процесса / И.Н. Якунин, О.М. Меньших, Д.М. Шунгулов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 7. – С. 138-145.
45. *Anisimov, O.* Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment / O. Anisimov, V. Kokorev, Y. Zhiltcova // Geographical Review. – 2017. – Vol. 107(1). – Pp. 108-124.
46. *Bastidas-Arteaga, E.* Reliability of Reinforced Concrete Structures Subjected to Corrosion-Fatigue and Climate Change / E. Bastidas-Arteaga // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2018. – Vol. 12. – N10.
47. *Belda, M.* CECILIA Regional Climate Simulations for Future Climate: Analysis of Climate Change Signal / M. Belda, et al // Advances in Meteorology. – 2015. – ID 354727.
48. *Bonnaventure, P.P.* Modelling climate change effects on the spatial distribution of mountain permafrost at three sites in northwest Canada / P.P. Bonnaventure, A.G. Lewkowicz // Climatic Change. – 2011. – Vol. 105(1-2). – Pp. 293–312.
49. *Derksen, C.* Variability and change in the Canadian cryosphere / C. Derksen, et al // Climatic Change. – 2012. – Vol. 115(1) – Pp. 59–88.

50. *Dong, Y.* Global Solar Radiation Forecasting Using Square Root Regularization-Based Ensemble / Y. Dong, H. Jiang // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2019. – ID 9620945.
51. *Donghyuk, K.*, Projecting Future Climate Change Scenarios Using Three Bias-Correction Methods / K. Donghyuk, et al // *Advances in Meteorology*. – 2014. – ID 704151.
52. *Eshghi, A.T.* Adaptive improved response surface method for reliability-based design optimization / A.T. Eshghi, S. Lee // *Engineering Optimization*. – 2019. – Vol. 51(12). – Pp. 2011-2029.
53. *Gao, H.* Subgrade settlement prediction based on least square support vector regression and real-coded quantum evolutionary algorithm / H. Gao, Q.-C. Song, J. Huang // *International Journal of Grid and Distributed Computing* – 2016. – Vol. 9(7). – Pp. 83–90.
54. *Ge, M.* Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment / M. Ge, et al // *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. – 2017. – Vol. 36(3). – Pp. 745–753.
55. *Glasser, R.* The Climate Change Imperative to Transform Disaster Risk Management / R. Glasser // *International Journal of Disaster Risk Science*. – 2020. – Vol. 11(2). – Pp. 152–154.
56. *Gruza, G.V.* Features of the temperature regime at the surface of the globe in 2018 / G.V. Gruza, et al // *Fundamental and Applied Climatology*. – 2019. – Vol. 1. – Pp. 97-127.
57. *He, J.* Reliability Analysis for Bypass Seepage Stability of Complex Reinforced Earth-Rockfill Dam with High-Order Practical Stochastic Response Surface Method / J. He, P. Zhang, X. Li // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2019.
58. *Hochrainer-Stigler, S.* Integrating Systemic Risk and Risk Analysis Using Copulas / S. Hochrainer-Stigler, et al // *International Journal of Disaster Risk Science*. – 2018. – Vol. 9(4). – Pp. 561–567.
59. *Hui, P.* Degradation characteristics of permafrost under the effect of climate warming and engineering disturbance along the Qinghai–Tibet Highway / P. Hui, et al // *Natural Hazards*. – 2015. – Vol. 75(3). – Pp. 2589–2605.
60. *Kaplan, J.O.* Arctic climate change with a 2 °C global warming: Timing, climate patterns and vegetation change / J.O. Kaplan, M. New // *Climatic Change*. – 2006. – Vol. 79(3-4). – Pp. 213–241.
61. *Kaymaz, I.* A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis / I. Kaymaz, C.A. McMahon // *Probabilistic Engineering Mechanics*. – 2005. – Vol. 20(1). – Pp. 11–17.
62. *Kershaw, T.* Assessing the risk of climate change for buildings: A comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations / T. Kershaw, M. Eames, D. Coley // *Building and Environment*. – 2011. – Vol. 46(6). – Pp. 1303-1308.

63. *Khrustalev, L.N.* Determination of the Temperature Coefficient for Calculation of the Bearing Capacity of Permafrost Beds in a Changing Climate / L.N. Khrustalev, L.V. Emel'yanova // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2013. – Vol. 50(1). – Pp. 19–23.
64. *Kronik, Y.A.* Reliability and Safety of the Foundations of Buildings and Structures on Permafrost / Y.A. Kronik // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2017. – Vol. 54(3). – Pp. 198–201.
65. *Lacasse, M.A.* Durability and Climate Change – Implications for Service Life Prediction and the Maintainability of Buildings / M.A. Lacasse, A. Gaur, T.V. Moore // *Buildings*. – 2020. – Vol. 10(3). – ID 53.
66. *Li, T.W.* Detecting Warming Hiatus Periods in CMIP5 Climate Model Projections / T.W. Li, N.C. Baker // *International Journal of Atmospheric Sciences*. – 2016. – ID 9657659.
67. *Li, Y.* A Combined Prediction Model for Subgrade Settlement Based on Improved Set Pair Analysis / Y. Li, et al // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2019.
68. *Liu, Q.* A Review of the Detection Methods for Climate Regime Shifts / Q. Liu, S. Wan, B. Gu // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. – 2016. – ID 3536183.
69. *Liu, X.* Durability Assessment of Lightweight Cellular Concrete in Subgrade by the Method of Analytic Hierarchy Process Combined with Fuzzy Comprehensive Evaluation / X. Liu, et al // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2019.
70. *Liu, X.* Simulation Analysis of the Long-Term Stability for Frozen Soil Roadbed / X. Liu, J. Jia, Y. Zhang // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – ID 605890.
71. *Magnan, A.K.* Estimating the global risk of anthropogenic climate change / A.K. Magnan, et al. // *Natural Climate Change*. – 2021. – Vol. 11. – Pp. 879–885.
72. *Mansour, D.M.M.* An assessment model for identifying maintenance priorities strategy for bridges / D.M.M. Mansour, et al // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 10(4). – Pp. 695-704.
73. *Mihailović, D.T.* Climate Predictions: The Chaos and Complexity in Climate Models / D.T. Mihailović, G. Mimić, I. Arsenić // *Advances in Meteorology*. – 2014. – ID 878249.
74. *Nik, V.M.* Future moisture loads for building facades in Sweden: Climate change and wind-driven rain / V.M. Nik, et al // *Building and Environment*. – 2015. – Vol. 93(2). – Pp. 362-375.
75. *Pakkala, T.A.* Durability demands related to frost attack for Finnish concrete buildings in changing climate / T.A. Pakkala, et al // *Building and Environment*. – 2014. – Vol. 82. – Pp. 27-41.
76. *Peng, H.* Degradation characteristics of permafrost under the effect of climate warming and engineering disturbance along the Qinghai–Tibet Highway / H. Peng, et al // *Natural Hazards*. – 2015. – Vol. 75(3). – Pp. 2589–2605.



77. *Renn, O.* Risk Governance: Application to Urban Challenges / O. Renn, A. Klinke, P. Schweizer // International Journal of Disaster Risk Science. – 2018. – Vol. 9(4). – Pp. 434–444.
78. *Sehizadeh, A.* Impact of future climates on the durability of typical residential wall assemblies retrofitted to the Passive Haus for the Eastern Canada region / A. Sehizadeh, H. Ge // Building and Environment. – 2016. – Vol. 97. – Pp. 111–125.
79. *Shiklomanov, N.I.* Climate Change and Stability of Urban Infrastructure in Russian Permafrost Regions: Prognostic Assessment Based on GCM Climate Projections / N.I. Shiklomanov, et al // Geographical Review. – 2017. – Vol. 107(1). – Pp. 125–143.
80. *Tafreshi, S.N.M.* A simplified method for predicting the settlement of circular footings on multi-layered geocell-reinforced non-cohesive soils / S.N.M. Tafreshi, et al // Geotextiles and Geomembranes. – 2015. – Vol. 43(4). – Pp. 332–344.
81. *Tak, H.Y.* System-Level Seismic Risk Assessment of Bridge Transportation Networks Employing Probabilistic Seismic Hazard Analysis / H.Y. Tak, W. Suh, Y.J. Lee // Mathematical Problems in Engineering. – 2019.
82. *Tian, W.* Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study / W. Tian, P. Wilde // Automation in Construction. – 2011. – Vol. 20(8). – Pp. 1096–1109.
83. *Trofimenko, Yu.V.* Modeling of Influence of Climate Change Character on the Territory of the Cryolithozone on the Value of Risks for the Road Network / Yu.V. Trofimenko, et al // International Journal of Online and Biomedical Engineering. – 2020. – Vol. 16(07). – Pp. 65–74.
84. *Wang, F.* Climate Warming in Response to Emission Reductions Consistent with the Paris Agreement / F. Wang, et al // Advances in Meteorology. – 2018. – ID 2487962.
85. *Wang, X.* Arctic Climate Variability and Trends from Satellite Observations / X. Wang, et al // Advances in Meteorology. – 2018. – ID 505613.
86. *Wang, Y.* Effect of climate change on flexural reliability of highway continuous girder bridge under wind load / Y. Wang, et al // Bridge Structures. – 2019. – Vol. 15(3). – Pp. 103–110.
87. *Yakubovich, A.* Monitoring and Predicting the State of the Road Network in Russia's Cryolitic Zone / A. Yakubovich, et al // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1116. – Pp. 924–933.
88. *Yakubovich, A.* Principles of developing a procedure to assess consequences of natural and climatic changes for transport infrastructure facilities in permafrost regions / A. Yakubovich, Yu. Trofimenko, P. Pospelov // Transportation Research Procedia. – 2018. – Vol. 36. – Pp. 810–816.
89. *Yakubovich, A.* Using the Response Surface to Assess the Reliability of the Russian Cryolithozone Road Network in a Warming Climate / A. Yakubovich, I. Yakubovich // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1258. – Pp. 486–495.

90. *Yakubovich, A.N.* A forecast model for a road network's section traffic capacity assessment on a territory of the cryolitozone in conditions of the climate change / A.N. Yakubovich, et al // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2019. – Vol. 1. – Pp. 275-280.
91. *Yakubovich, A.N.* Intelligent Management System of the Automobile Road's Technical and Operational Condition in the Cryolithozone / A.N. Yakubovich, et al // Proceedings Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019'03.
92. *Yan, B.* Climate Change Detection and Annual Extreme Temperature Analysis of the Amur River Basin / B. Yan, et al // Advances in Meteorology. – 2016. – ID 6268938.
93. *Yao, X.* Three dimensional analysis of large strain thaw consolidation in permafrost / X. Yao, J. Qi, W. Wu // Acta Geotechnica. – 2012. – Vol. 7(3). – Pp. 193–202.
94. *Ye, T.* Analog modeling of sand slope stability with different precipitation conditions / T. Ye, et al // Journal of Modern Transportation. – 2018. – Vol. 26(3). – Pp. 200-208.
95. *Zhang, C.* Novel Prediction Method for Highway Distresses in Permafrost Regions Based on Qualitative Reasoning of Multidimensional and Multirules Cloud Model / C. Zhang, et al // Mathematical Problems in Engineering. – 2019. – ID 7910752.
96. *Zhang, Z.* Temperature Forecasting via Convolutional Recurrent Neural Networks Based on Time-Series Data / Z. Zhang, Y. Dong // Mathematical Problems in Engineering. – 2020. – ID 3536572.

*Научное издание*

**ТРОФИМЕНКО** Юрий Васильевич  
**ЯКУБОВИЧ** Анатолий Николаевич

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКОВ И МЕР  
ПО АДАПТАЦИИ ОБЪЕКТОВ  
ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ  
К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ

*Редактор* Г.Н. Середина

*Редакционно-издательский отдел МАДИ. E-mail: [rio@madi.ru](mailto:rio@madi.ru)*

Подписано в печать 07.06.2022 г. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 10,2. Тираж 200 экз. Заказ .

МАДИ, Москва, 125319, Ленинградский пр-т, 64.