

УДК 551.340: 624.139

**В.А. Исаков<sup>1</sup>****ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ В ОСНОВАНИЯХ ДОРОГ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ<sup>2</sup>**

Рассмотрены направленность и основные причины изменения температурного режима в основаниях дорожных насыпей в криолитозоне. В программе “WARM” выполнено моделирование температурного поля в основании дорожных насыпей для 11 пунктов криолитозоны с учетом их климатических и геокриологических особенностей. По результатам моделирования выделено 4 основных типа многолетнего квазистационарного состояния температурного поля в основаниях дорог: устойчивый, переходный низкотемпературный, переходный высокотемпературный и неустойчивый. Рассмотрены основные причины их формирования: дополнительный разогрев искусственно созданных поверхностей, перераспределение снега и особенности морфологии дорожной насыпи, препятствующие равномерному промерзанию мерзлых грунтов в ее основании. Сделан вывод о влиянии характерных неравномерностей температурного поля на сезонную и многолетнюю динамику геокриологических условий в природно-технической системе земляного полотна. На основании литературных источников и полевых наблюдений проведена апробация результатов моделирования, показавшая их высокую сходимость с результатами натурных наблюдений. Отмечено, что в регионах, где по результатам расчета отмечается устойчивый и переходный низкотемпературный тип квазистационарного температурного поля, также наблюдаются деформации дорожных насыпей, вызванные динамическими нагрузками либо активизацией опасных криогенных процессов.

*Ключевые слова:* криолитозона, дорожная насыпь, моделирование, региональная изменчивость.

**Введение.** Разнообразие природных условий криолитозоны России очень велико, многие факторы природной среды вносят значительный и своеобразный вклад в формирование и свойства массивов мерзлых пород. Техногенная нагрузка при строительстве и эксплуатации дорог изменяет соотношение и масштаб воздействия различных факторов на верхние горизонты мерзлых пород и вызывает изменение свойств последних, что часто приводит к деформациям и выходу из строя дорожного полотна. Поэтому основная цель исследования — определение закономерностей изменения геокриологической обстановки в основаниях автомобильных и железных дорог в различных регионах криолитозоны России. Обеспечение устойчивости дорог в криолитозоне — одна из наиболее длительно разрабатываемых задач инженерного мерзлотоведения, поставленная практически одновременно с появлением этой науки на рубеже XIX и XX вв. В пределах области распространения мерзлых пород и глубокого сезонного промерзания построены тысячи километров железных и автомобильных дорог, крупнейшие из которых Транссибирская, Байкало-Амурская, Амуро-Якутская магистрали, так называемая Мертвая дорога (Салехард—Уренгой—Игарка), федеральные автотрассы “Амур”, “Колыма” и “Вилюй”. Многие из этих объектов, как построенные в начале XX в. (Транссибирская магистраль), так и относительно недавно

(автодорога “Амур”), испытывают значительные деформации, связанные с изменением геокриологической обстановки и активизацией криогенных процессов в их основаниях и на прилегающих территориях (рис. 1).

Изменения геокриологической обстановки в основаниях насыпей провоцируются в первую очередь формированием новых условий теплообмена мерзлых пород с атмосферой при строительстве и эксплуатации дорог, что связано с перераспределением снежного покрова (расчистка основной площадки, складирование и метелевое переотложение снега), увеличенным поступлением солнечной радиации за счет сравнительно низкого альбеда искусственных покрытий, отсутствием теплоизолирующего влияния растительных покровов (в результате сведения древесного и кустарничкового, а также уплотнения мохово-торфяного покровов). Региональная дифференциация таких показателей, как длительность теплых и холодных сезонов, количество солнечной радиации, поступающей на поверхность грунтов, мощность и обогревающее влияние снежного покрова, скорость ветра, интенсивность метелей, проективное покрытие растительного покрова, распространение и мощность мохово-торфяного покрова, позволяют предположить наличие региональных различий в динамике температурного поля в основаниях дорог.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, аспирант; *e-mail:* isakov.gc@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, аспирант; *e-mail:* isakov.gc@gmail.com



Рис. 1. Деформации дорожных насыпей в криолитозоне: слева — оседание насыпи автодороги Норильск — Талнах (построена в 1960-х гг., фото в сентябре 2010 г.), справа — волнообразные деформации на автодороге “Амур” (строительство закончено в 2010 г, фото в августе 2013 г., предоставлено С.А. Пищуловым)

В пределах России выделяются крупные районы со специфической направленностью процессов криолитогенеза, близкие по климатическим, геологическим, геоморфологическим, палеогеографическим и ландшафтным характеристикам [Региональная..., 1989]. Под влиянием криогенных процессов происходит формирование определенных комплексов многолетнемерзлых пород, особенности криогенного строения и термодинамического баланса которых способны в значительной мере повлиять на динамику геокриологической обстановки в основаниях дорожных насыпей.

Мерзлые породы в основаниях насыпей в зависимости от механического состава и криогенного строения по-разному реагируют на изменение температурного поля, происходящее под воздействием техногенной нагрузки. В сильнольдистых мерзлых породах отчетливее проявляется эффект температурного сдвига [Методика..., 1979], что вместе с высокими затратами тепла на фазовые переходы воды в отдельных случаях может нивелировать негативное воздействие техногенного отепления [Пармузин, 2008]. В то же время отепляющее влияние снежного покрова одинаковой мощности на участках водонасыщенных грунтов будет больше, чем на сухих [Основы..., 1974]. Осадка сильнольдистых грунтов при их оттаивании, как правило, существенно выше, чем слабольдистых. Вода, выделяющаяся при вытаивании льда и уплотнении оттаявшей грунтовой массы под действием тепловой и механической нагрузки от насыпи, служит дополнительным источником переувлажнения сезонно-талого слоя и таликовых зон и может способствовать активизации опасных криогенных процессов.

Следует отметить, что в работах, посвященных изменению геокриологической обстановки в основаниях железных и автомобильных дорог в криолитозоне, как правило, рассматриваются отдельные объекты (Байкало-Амурская и Транссибирская магистрали [Кондратьев, 2011; Лисицына и др., 1989], автодорога “Амур” [Бедрин, Дубенков, 2014; Кондратьев, 2011], железные дороги Обская–Бованенково [Шаманова, Титков, Максимов, 2012], Улак-

Эльга [Исаков, Наумов, Телков, 2013] и др.), расположенные в пределах одного-трех соседних регионов криолитозоны. Отличаются в первую очередь технологические решения при строительстве дорог, длительность эксплуатации объектов дорожной сети, количество и качество мониторинговых, в том числе термометрических, наблюдений на разных участках дорожной сети в криолитозоне [Исаков, Телков, 2013]. Все указанное делает проблематичным проведение сравнительного анализа динамики геокриологической обстановки в основаниях дорог в регионах криолитозоны России.

**Материалы и методы исследований.** Для определения динамики геокриологической ситуации в основаниях дорог в криолитозоне выполнено моделирование температурного поля земляного полотна для разных климатических и грунтовых условий. В качестве объекта моделирования выбрана насыпь с высотой 6 м, шириной основной площадки 9 м, откосами крутизной 1:1,5 (проективная длина откоса 9 м), сложенная гравийно-щебеночной смесью (до высоты 5 м) и балластным щебнем (1 м). (Насыпи распространены в качестве земляного полотна на дорогах в криолитозоне существенно шире, чем выемки, что связано с рекомендациями нормативных документов проектировать земляное полотно на участках со сложными мерзлотно-грунтовыми условиями преимущественно с насыпями [Ведомственные..., 1990; Строительные..., 1987].) Высота насыпи выбрана с учетом требований к минимальной высоте насыпи, условий снегозаносимости и распространения на автомобильных и железных дорогах в равнинной, предгорной и горной частях криолитозоны. Ширина основной площадки, выбранной для моделирования насыпи, соответствует требованиям, предъявляемым к однопутным железным дорогам [Строительные..., 1995] и автомобильным дорогам IV–V категорий [Строительные..., 1987]. Выбор крупнообломочного состава грунтов насыпи обусловлен возможностью применять их без ограничений на различных по состоянию и свойствам грунтах оснований; физические и теплофизические характеристики грунтов взяты из работы [Хрусталева, 2005] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физические и теплофизические свойства некоторых материалов, используемых в дорожном строительстве, по [Хрусталеv, 2005]**

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$w_{tot}$ , д.е.	$\lambda_{th}$ , ккал/(м·ч·°C)	$\lambda_p$ , ккал/(м·ч·°C)	$C_{th}$ , ккал/(м <sup>3</sup> ·°C)	$C_p$ , ккал/(м <sup>3</sup> ·°C)
Балластный щебень	1900	0,05	1,25	1,3	563	522
Гравийно-щебеночная смесь	2060	0,03	1,8	1,85	626	580

Такие условия моделирования позволяют не учитывать ряд технологических факторов, таких, как положение насыпи на местности, увлажнение основания, разная высота насыпи, длительность эксплуатации сооружения, особенности проектных и строительных решений. Прогноз температурного поля земляного полотна выполнен в разработанной под руководством проф. Л.Н. Хрусталева программе WARM [Хрусталеv и др., 1994], в основе которой лежит решение нестационарной задачи теплопроводности с учетом условия Стефана — подвижная граница раздела фаз. Моделирование проводилось без учета конвективных теплотоков как в зимнее, так и в летнее время. Не учитывались конденсация водяного пара в порах насыпи и отепляющее влияние дождевых осадков в летний период. Приведенные выше природные факторы обладают как охлаждающим, так и отепляющим влиянием на мерзлые грунты. Учет только кондуктивного теплообмена позволяет применять результаты моделирования как для железных дорог, где основная площадка сложена дренирующими грунтами, так и для автомобильных дорог с твердым покрытием.

Моделирование температурного поля земляного полотна выполнено для 11 пунктов в пределах криолитозоны (Краснощелье, Нарьян-Мар, Воркута, Амдерма, Салехард, Тазовский, Дудинка, Анадырь, Якутск, Чита, Бомнак). В этих пунктах расположены метеостанции, для которых в открытом доступе есть необходимые для моделирования климатические параметры (среднемесячная температура воздуха, скорость ветра и мощность снежного покрова) за достаточно длительные периоды наблюдений [Архив..., 2014]. Учитывая длительность эксплуатации дорог в криолитозоне, срок которой составляет многие десятки лет, применение длинных рядов данных позволяет нивелировать наличие короткопериодных колебаний температуры воздуха, особо ощутимых в северных широтах [Шполянская, 2008]. В связи с короткопериодными климатическими колебаниями не учтены тренды на межгодовое изменение температуры воздуха.

Расчет температуры искусственных покрытий с учетом радиационной поправки осуществлен по методике, приведенной в работе [Хрусталеv, 2005]. Для периодов с отрицательной среднемесячной температурой температура на поверхности основной площадки и снежного покрова принималась равной температуре воздуха.

Для основной площадки насыпи альбедо имеет значение 0,1 (темное асфальтобетонное покрытие в случае автомобильных дорог и загрязненная неф-

тепродуктами, металлической и угольной пылью, бытовыми отходами основная площадка железных дорог), для откосов — 0,14 (щебенистое покрытие). Распределение снежного покрова принято исходя из условий его регулярной счистки с основной площадки и равномерного распределения по откосам.

$$H_{отк} = H_0 (1 + S_{осн}/2S_{отк}), \quad (1)$$

где  $H_{отк}$  — мощность снежного покрова на откосах насыпи, м;  $S_{осн}$  — длина поперечного сечения основной площадки, м;  $S_{отк}$  — длина поперечного сечения поверхности откоса, м;  $H_0$  — мощность снежного покрова в естественных условиях, м.

При моделировании не учитывалось увеличение мощности и плотности снежного покрова за счет метелевого переотложения на откосах и территории, прилегающей к насыпи.

Плотность снежного покрова определяли по формуле из [Каган, Кривоногова, 1978] с допущением, что при уменьшении высоты снежного покрова в весенний период не уменьшается его плотность вследствие инфильтрации и повторного замерзания талых вод в снежной толще:

$$P = 180z + 90, \quad (2)$$

где  $P$  — плотность снежного покрова, кг/м<sup>3</sup>,  $z$  — высота снежного покрова, м. Мощность снежного покрова на основной площадке принята равной нулю.

Мерзлые породы в качестве оснований для искусственных сооружений в разной степени подвержены изменениям под воздействием техногенной нагрузки. Учет криогенного строения естественных мерзлых грунтов особенно важен для южных регионов криолитозоны, где в современных климатических условиях многолетнемерзлые породы могут существовать только в специфических условиях (торфяные массивы, горные котловины). Для всех исследованных пунктов на основании литературных данных [Криолитологическая..., 1985; Региональная..., 1989], а также по данным полевых исследований автора построены разрезы, обобщенно характеризующие криолитологическое строение верхних горизонтов мерзлых пород (табл. 2). Теплофизические характеристики грунтов естественного основания взяты из [Строительные..., 1990]. Тепловой поток на нижней границе расчетной области был задан, равным нулю. Температура многолетнемерзлых пород на глубине 10 м принята на основании обобщения фактического материала автора и региональных геотермических условий [Региональная..., 1989].

Таблица 2

Состав, свойства и среднегодовая температура грунтов оснований для регионов криолитозоны, принятые в расчетах

Регион	Глубина залегания слоя, м										$T_0$ , °C	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Красношелье	торф; 0,3; 2,0*	торф; 0,3; 2,0	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	-1,0
Нарьян-Мар	торф; 0,3; 2,0	сугл; 1,4; 0,35	сугл; 1,4; 0,35	песок; 1,6; 0,2	песок; 1,6; 0,2	сугл; 1,8; 0,1	сугл; 1,8; 0,1	сугл; 1,8; 0,1	сугл; 1,8; 0,1	сугл; 1,8; 0,1	сугл; 1,8; 0,1	-1,0
Воркута	сугл; 1,6; 0,3	сугл; 1,6; 0,3	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	суп; 1,6; 0,15	-2,5
Амдерма	суп; 1,4; 0,2	суп; 1,4; 0,2	суп; 1,4; 0,2	песок; 1,4; 0,2	песок; 1,4; 0,2	глина; 1,6; 0,25	глина; 1,6; 0,25	песок; 1,6; 0,2	песок; 1,6; 0,2	сугл; 1,8; 0,1	сугл; 1,8; 0,1	-3,0
Салехард	торф; 0,4; 2,0	торф; 0,4; 2,0	песок; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	сугл; 1,4; 0,35	сугл; 1,4; 0,35	сугл; 1,6; 0,2	сугл; 1,6; 0,2	сугл; 1,6; 0,2	сугл; 1,6; 0,2	сугл; 1,6; 0,2	-2,0
Тазовский	сугл; 1,4; 0,25	сугл; 1,4; 0,25	суп; 1,4; 0,25	суп; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	сугл; 1,6; 0,25	сугл; 1,6; 0,25	сугл; 1,6; 0,25	суп; 1,6; 0,2	суп; 1,6; 0,2	-2,5
Дудинка	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	сугл; 1,2; 0,4	-2,5
Анадырь	песок; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	песок; 1,4; 0,25	суп; 1,4; 0,35	суп; 1,4; 0,35	суп; 1,4; 0,35	суп; 1,4; 0,35	суп; 1,4; 0,35	суп; 1,4; 0,35	-3,0
Якутск	песок; 1,4; 0,2	песок; 1,4; 0,2	песок; 1,4; 0,2	глина; 1,4; 0,2	песок; 1,6; 0,2	песок; 1,6; 0,2	песок; 1,6; 0,2	глина; 1,6; 0,2	глина; 1,6; 0,2	песок; 1,8; 0,15	песок; 1,8; 0,15	-2,5
Чита	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	песок; 1,6; 0,15	песок; 1,6; 0,15	песок; 1,6; 0,15	песок; 1,6; 0,15	песок; 2,0; 0,15	песок; 2,0; 0,15	песок; 2,0; 0,15	-1,0
Бомнак	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	сугл; 1,8; 0,2	песок; 1,6; 0,15	песок; 1,6; 0,15	песок; 1,6; 0,15	песок; 1,6; 0,15	песок; 2,0; 0,15	песок; 2,0; 0,15	песок; 2,0; 0,15	-1,0

\* Наименование грунта (сугл — суглинок, суп — супесь); его плотность ( $\tau/\text{м}^3$ ); влажность за счет свободной воды (д. ед);  $T_0$  — среднегодовая температура мерзлых грунтов на глубине 10 м.

Температура насыпных грунтов в начальный момент расчета (окончание холодного сезона в год строительства) в зависимости от региона и высоты слоя задавалась в диапазоне от  $-2,7$  °C до  $-7$  °C с учетом послойного промораживания грунтов насыпи при ее строительстве в зимний период.

Моделирование температурного поля выполнено на период 50 лет, это достаточное время для формирования нового квазистационарного температурного поля в основании земляного полотна.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты расчета температуры искусственных поверхностей, приведенные в табл. 3, показывают, что ее повышение для искусственных поверхностей в разных регионах криолитозоны неравномерно. Различные сочетания основных природных факторов, используемых в расчете, — поступление солнечной радиации, скорость ветра и продолжительность холодного и теплого сезонов — приводят к существенной дифференциации температуры на искусственных поверхностях даже в пунктах с близкой среднегодовой температурой воздуха. Повышение разницы значений среднегодовой температуры на разных поверхностях в пределах земляного полотна и прилегающей территории увеличивает неравномерность температурного поля в основаниях дорог.

Результаты расчета мощности снежного покрова на откосах насыпи приведены в табл. 4. Они позволяют сделать вывод об увеличении неравномерности зимнего промерзания при увеличении высоты снежного покрова.

Данные, полученные при расчете температуры искусственных поверхностей и мощности снега на откосе насыпей, дают возможность предположить наличие значительных неравномерностей в сезонной и многолетней динамике температурного поля в основании дорожных насыпей в разных регионах криолитозоны, что подтверждается результатами моделирования.

Моделирование температурного поля для 11 пунктов в криолитозоне России показало значительную региональную дифференциацию динамики геокриологической обстановки в основании дорожных насыпей. Выделено 4 основных типа квазистационарного (с относительно стабильной среднегодовой температурой грунтов на разных глубинах) температурного состояния насыпных и естественных грунтов:

1) устойчивый тип (Амдерма, Анадырь) характеризуется стабильностью или понижением температуры насыпных и естественных грунтов и подъемом кровли вечной мерзлоты в пределах сооружения;

Таблица 3

Температура искусственных и естественных поверхностей по месяцам и средняя за год

Пункт (период наблюдений)	Температура поверхности*, °С												Год*
	месяц												
	1**	2**	3**	4**	5*	6*	7*	8*	9*	10**	11**	12**	
Краснощелье (1953–2011)	–14,0	–13,9	–9,3	–3,5	3,1; 11,8; 14,3	10,0; 18,7; 21,3	13,5; 22,1; 24,9	10,8; 18,1; 21,2	6,1; 11,9; 14,6	–0,3	–7,2	–11,2	–1,32; 1,2; 2,1
Нарьян-Мар (1926–2008)	–16,9	–16,8	–12,9	–6,5	0,3; 8,0; 10,3	8,2; 15,5; 17,7	13,3; 20,8; 23,2	11,1; 17,3; 19,8	5,9; 11,2; 13,6	–1,2	–8,7	–13,5	–3,1; –0,9; –0,2
Воркута (1953–2011)	–19,5	–20,0	–13,9	–10,0	–1,9	7,6; 12,9; 14,2	13,2; 18,5; 20,0	9,7; 14,1; 15,7	4,3; 8,2; 9,6	–3,4	–13,3	–17,6	–5,4; –3,8; –3,3
Амдерма (1948–2011)	–19	–19,8	–15,6	–11,8	–4,9	2,2; 7,5; 8,8	7,6; 12,7; 14,2	7,0; 11,0; 12,4	4,0; 7,5; 8,7	–3,5	–10,9	–15,0	–6,6; –5,1; –4,7
Салехард (1936–2011)	–23,2	–22,9	–14,9	–9,1	–0,5	9,5; 16,8; 19,0	14,8; 22,0; 24,4	11,4; 18,1; 20,8	5,3; 11,1; 13,7	–3,0	–15,3	–20,7	–5,7; –3,5; –2,6
Тазовский (1953–2011)	–26,4	–26,3	–19,3	–13,6	–4,2	7,3; 13,1; 14,6	14,5; 19,6; 21,1	11,4; 15,8; 17,4	4,6; 8,7; 10,2	–6	–18,3	–24,3	–8,4; –6,8; –6,3
Дудинка (1948–2011)	–26,9	–26,6	–21,2	–15,1	–5,0	6,7; 11,8; 13,1	13,8; 18,5; 19,9	11,2; 15,3; 16,7	4,0; 7,7; 9,1	–7,9	–20,5	–25,1	–9,4; –7,9; –7,5
Анадырь (1949–2011)	–22,6	–22,0	–19,3	–12,8	–1,6	6,3; 10,9; 12,0	11,6; 15,7; 16,8	10,1; 13,7; 14,8	4,6; 8,2; 9,4	–4,6	–13,3	–19,3	–6,9; –5,6; –5,2
Якутск (1888–2008)	–38,6	–33,8	–20,1	–4,8	7,5; 16,5; 19,2	16,4; 25,4; 28,2	19,5; 28,7; 31,7	15,2; 23,1; 26,2	6,1; 13,0; 16,1	–7,8	–27,0	–37,6	–8,8; –5,3; –4,0
Чита (1933–2011)	–26,1	–21,2	–10,8	0,6; 9,0; 11,5	8,9; 17,2; 19,7	16,1; 25,4; 28,3	18,8; 29,1; 32,2	15,7; 25,2; 28,7	8,3; 16,5; 19,7	–1,0	–13,8	–23,2	–2,3; 2,2; 3,7
Бомнак (1953–2011)	–32,5	–24,3	–13,5	–1,7	7,4; 16,3; 19,0	14,3; 23,6; 26,6	17,8; 27,6; 30,8	15,3; 24,3; 27,7	8,5; 16,4; 19,7	–3,1	–19,6	–30,4	–5,2; 1,7; 3,0

\* За летние месяцы и в среднем за год — температура естественной поверхности; температура откоса; температура основной площадки; \*\* температура поверхности снега и основной площадки в зимний период.

2) переходный низкотемпературный тип (Воркута, Тазовский, Дудинка) характеризуется повышением температуры грунтов в пределах зоны ее отрицательных значений при подъеме кровли вечной мерзлоты и в отдельных случаях локальным понижением температуры под основной площадкой насыпи. Конфигурация верхней границы многолетнемерзлых пород приближена к конфигурации поверхности насыпи. У подножий откосов формируются таликовые зоны мощностью до 1–2 м и околонулевой температурой грунтов;

3) переходный высокотемпературный тип (Нарьян-Мар, Салехард, Якутск) характеризуется значительным повышением температуры в основании насыпи и формированием таликовых зон под от-

косами насыпей. Под основной площадкой сохраняются отрицательная среднегодовая температура насыпных грунтов и многолетнемерзлое состояние естественных грунтов при их высокой (не ниже –1 °С) температуре;

4) неустойчивый тип (Краснощелье, Чита, Бомнак) характеризуется формированием чаши оттаивания значительной мощности под дорожной насыпью.

Характер залегания кровли многолетнемерзлых грунтов для пунктов с разным типом квазистационарного температурного состояния грунтов представлен на рис. 2.

Анализ динамики изменения температурного поля при переходе к квазистационарному состоянию в условиях техногенного изменения условий

Таблица 4

## Среднемесячная мощность снежного покрова

Пункт	Мощность снежного покрова* (м) по месяцам											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Краснощелье	0,32; 0,46	0,44; 0,63	0,51; 0,73	0,40; 0,57	0,18; 0,26	0,04; 0,06	0	0	0	0,06; 0,09	0,11; 0,16	0,19; 0,27
Нарьян-Мар	0,46; 0,66	0,55; 0,78	0,65; 0,93	0,61; 0,87	0,35; 0,5	0,03; 0,04	0	0	0,01; 0,01	0,06; 0,09	0,17; 0,24	0,28; 0,40
Воркута	0,47; 0,67	0,66; 0,94	0,81; 1,15	0,84; 1,19	0,53; 0,75	0,04; 0,06	0	0	0	0,06; 0,09	0,17; 0,24	0,3; 0,43
Амдерма	0,13; 0,19	0,17; 0,24	0,22; 0,31	0,26; 0,37	0,21; 0,3	0,17; 0,24	0	0	0,02; 0,03	0,05; 0,07	0,06; 0,09	0,13; 0,19
Салехард	0,36; 0,51	0,4; 0,57	0,45; 0,64	0,36; 0,51	0,17; 0,24	0	0	0	0	0,05; 0,07	0,2; 0,28	0,3; 0,43
Тазовский	0,44; 0,63	0,55; 0,78	0,67; 0,95	0,72; 1,03	0,52; 0,74	0,12; 0,17	0	0	0,07; 0,10	0,09; 0,13	0,23; 0,33	0,34; 0,48
Дудинка	0,54; 0,77	0,65; 0,92	0,69; 0,98	0,7; 0,99	0,62; 0,88	0,06; 0,09	0	0	0	0,12; 0,17	0,32; 0,45	0,45; 0,64
Анадырь	0,16; 0,23	0,17; 0,24	0,19; 0,27	0,19; 0,27	0,08; 0,11	0	0	0	0	0,03; 0,04	0,06; 0,09	0,11; 0,16
Якутск	0,27; 0,38	0,31; 0,44	0,33; 0,47	0,21; 0,3	0	0	0	0	0	0,04; 0,06	0,15; 0,21	0,22; 0,31
Чита	0,1; 0,14	0,1; 0,14	0,07; 0,1	0,06; 0,09	0,08; 0,11	0	0	0	0	0,02; 0,03	0,05; 0,07	0,08; 0,11
Бомнак	0,27; 0,38	0,29; 0,41	0,3; 0,43	0,09; 0,13	0	0	0	0	0	0,03; 0,04	0,1; 0,14	0,23; 0,33

\* Мощность снежного покрова в естественных условиях и на откосе насыпи.

внешнего теплообмена позволил выявить основные причины дифференциации температурных условий в основаниях дорожных насыпей. В пунктах, где сформировался *устойчивый тип* квазистационарного температурного поля, среднезимняя мощность снежного покрова относительно невелика, что не препятствует интенсивному выхолаживанию

грунтов в холодный период года. Снег часто сохраняется и в период с положительной температурой, что сдерживает оттаивание промерзших грунтов.

В пунктах с *переходным низкотемпературным типом* квазистационарного температурного поля мощность снега максимальна среди всех рассмотренных типов, что, несмотря на сравнительно низ-

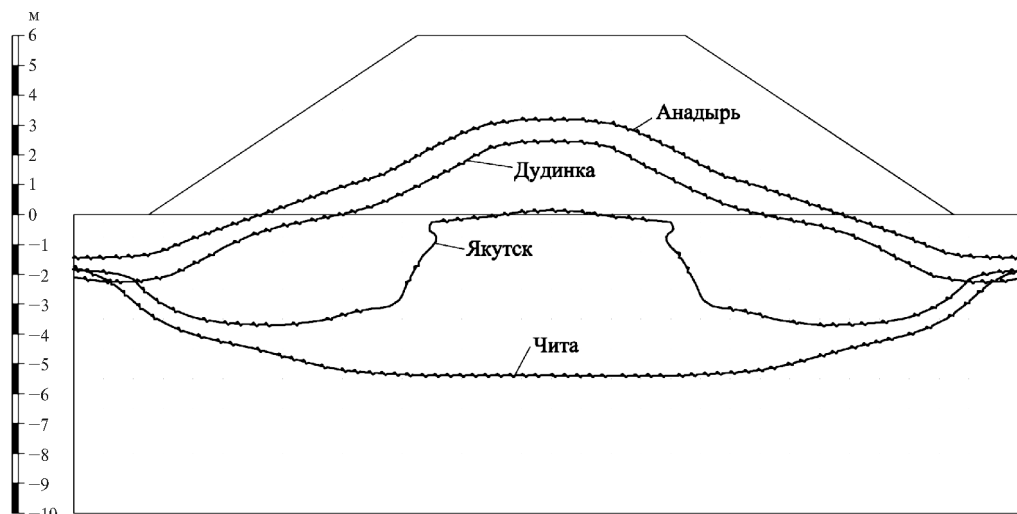


Рис. 2. Положение кровли вечной мерзлоты под дорожной насыпью в пунктах, где зафиксированы разные типы квазистационарного температурного состояния грунтов

кие значения среднегодовой температуры, практически блокирует промерзание откосов насыпей в зимний период. В результате фронт промерзания распространяется преимущественно от основной площадки насыпи, что приводит к увеличению физического расстояния, которое необходимо пройти волне холода, и снижению ее охлаждающей способности на подошве откосов насыпи, где под воздействием летнего отепления образуются талики.

*Переходный высокотемпературный* квазистационарный температурный режим формируется в пунктах, для которых характерна длительная продолжительность летнего сезона при суровых зимах и средней высоте снежного покрова. В таких условиях наблюдается быстрое промерзание насыпных грунтов под основной площадкой и замедленное под откосами. При этом снежный покров не задерживается в теплые периоды, что обуславливает хороший прогрев насыпи по всему контуру контакта с атмосферой. Таким образом, в основании откосов формируются благоприятные условия для многолетнего оттаивания грунтов.

При расчете температуры на искусственных поверхностях для пунктов, где отмечено формирование *неустойчивого* квазистационарного температурного режима, получены положительные значения (табл. 3), даже без учета отепляющего влияния снежного покрова. В таких условиях сохранение мерзлого состояния грунтов насыпи и ее естественного основания возможно только при применении специальных мер по стабилизации мерзлотной обстановки.

При формировании многолетнего квазистационарного температурного поля и его сезонных изменений широко проявляются особенности теплообмена через поверхность, свойственные природно-технической системе земляного полотна, — повышенный нагрев искусственных поверхностей летом и неравномерное распределение снега зимой, а также специфическая морфология насыпи. Под влиянием этих особенностей теплообмена распределение температуры в многолетнем квазистационарном состоянии и в сезонной динамике приобретает характерные исключительно для земляного полотна неравномерности, которые служат причиной активизации криогенных процессов, неблагоприятных для устойчивости земляного полотна.

Апробация результатов моделирования выполнена на основании литературных данных, а также полевых исследований, проведенных на автомобильных и железных дорогах в разных регионах криолитозоны. Район Анадыря, отнесенный по результатам моделирования к районам с *устойчивым типом* температурного поля, характеризуется очень высокой степенью деформаций земляного полотна автомобильных дорог. До 60% автодорог в регионе [Бедрин и др., 2012] нуждается в реконструкции и испытывает регулярные деформации, прежде всего осадку. Также отмечены резкое увеличение деформаций земляного полотна при понижении высоты

насыпи (особенно ниже 0,8–1,0 м) и высокая снеготранспортируемость дорог. Деформации низких насыпей могут быть вызваны не многолетним оттаиванием вечномерзлых пород, а снижением несущей способности переувлажненного сезонно-талого слоя (мощность которого по результатам моделирования может достигать 3 м под основной площадкой) в основаниях дорог, а также активизацией опасных криогенных процессов, в первую очередь термокарста и пучения.

Исследования, проведенные автором в 2010–2011 гг. на участках дорог в Норильском промышленном районе (недалеко от г. Дудинка) [Исаков, 2012] и в Пур-Тазовском междуречье (пос. Тазовский), т.е. в тех регионах, для которых по результатам моделирования характерен *переходный низкотемпературный тип* квазистационарного температурного поля в основаниях дорожных насыпей, показали широкое развитие подтопления и деформаций откосов, а также ступенчатого отседания основной площадки. В целом это подтверждает вывод, сделанный по результатам моделирования, — существенное снижение несущей способности грунтов в основании насыпи по направлению от оси к откосам земляного полотна.

Наблюдения, проведенные на участках железных дорог в южной части Мало- и Большеземельской тундры, а также в лесотундре Западной Сибири, — регионах, которые отнесены к районам с *переходным высокотемпературным типом* квазистационарного поля, показали, что кровля многолетнемерзлых пород в основаниях насыпей имеет характерную W-образную форму [Канаев, 1994], что соответствует результатам моделирования. Полевые исследования автора на участке железной дороги Кердем–Нижний Бестях, расположенном вблизи от г. Якутск, показали широкое развитие оседания откосов насыпи и переувлажнения их оснований, что свидетельствует о неблагоприятном изменении геокриологической обстановки и соответствует данным моделирования.

Территория участка 0–54 км железной дороги Улак–Эльга, пролегающей недалеко от пос. Бомнак, по результатам моделирования относится к *неустойчивому типу* квазистационарного температурного поля, что подтверждается подробными данными полевых наблюдений [Исаков и др., 2013]. Моделирование теплового режима грунтов оснований насыпи показало, что на 10-й год эксплуатации мощность таликовой зоны в естественных грунтах под насыпью достигнет 5 м. В ходе исследований на трассе железной дороги через 10 лет после строительства выявлены талики мощностью >10 м. Широкое распространение в основаниях насыпей неустойчивого типа квазистационарного температурного поля применительно к Забайкалью и югу Дальнего Востока подтверждают данные о многочисленных деформациях на участках Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей и автодороги “Амур” [Кондратьев, 2011].

Таким образом, сравнение результатов моделирования с данными наблюдений показало, что деформации дорожных насыпей широко проявляются, в том числе, в районах с устойчивым и переходным низкотемпературным типом квазистационарного температурного поля в основании дорожных насыпей. Это может быть связано со специфическими динамическими нагрузками от дорожных насыпей на мерзлые и сезоннооттаивающие грунты основания, а также с активизацией опасных криогенных процессов на прилегающей к дорогам территории в результате нарушения растительного покрова, избыточного снегонакопления или подтопления территории.

#### Выводы:

— продемонстрировано наличие значительных региональных различий в динамике изменения гео-

криологической обстановки в основаниях насыпей, что определяется в первую очередь температурным состоянием мерзлых грунтов;

— по результатам моделирования выделены 4 основных типа квазистационарного состояния температурного поля в основаниях дорожных насыпей, которые определяются сочетанием основных факторов природной среды; техногенное изменение последних влияет на термодинамический баланс многолетнемерзлых пород;

— апробация результатов моделирования показала их высокую сходимость с результатами натурных наблюдений. Для уточнения примененной модели необходима разработка методики учета метелевого переотложения снега на обочинах и техногенного подтопления дорожной насыпи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

#### REFERENCES

Архив климатических данных. URL: <http://climate-base.ru> (дата обращения: 25.11.2014).

Бедрин Е.А., Дубенков А.А. Анализ причин сверхнормативных деформаций на автомобильных дорогах в условиях высокотемпературной мерзлоты (по результатам мониторинга автомобильной дороги “Амур”) // Вестн. СибАДИ. 2014. Вып. 3 (37). С. 48–52.

Bedrin E.A., Dubenkov A.A. Analiz prichin sverhnormativnyh deformacij na avtomobil'nyh dorogah v uslovijah vysokotemperaturnoj merzloty (po rezul'tatam monitoringa avtomobil'noj dorogi “Amur”) [Analysis of reason above-level road deformation on high-temperature permafrost (monitoring road “Amur” results)], Vestnik SibADI, 2014, V. 3 (37), pp. 48–52 (in Russian).

Бедрин Е.А., Завьялов А.М., Завьялов М.А. Обеспечение термической устойчивости основания земляного полотна на автомобильных дорогах. Омск: СибАДИ, 2012. 178 с.

Bedrin E.A., Zav'jalov A.M., Zav'jalov M.A. Obespechenie termicheskoj ustojchivosti osnovanija zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog [Maintenance of road basement temperature stability], SibADI, Omsk, 2012, 178 p. (in Russian).

Ведомственные строительные нормы. ВСН 61-89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. М.: ВПИТрансстрой Мин-ва транспортного строительства, 1990. 208 с.

Vedomstvennye stroitel'nye normy. VSN 61-89. Izyskanija, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznyh dorog v rajonah vechnoj merzloty [Departmental building regulations 61-89. Engineering investigations, design and construction railroads on permafrost regions], VPItransstroja ministerstva transportnogo stroitel'stva, Moscow, 1990, 208 p. (in Russian).

Исаков В.А. Основные типы и причины развития деформаций автомобильных и железных дорог в Норильском промышленном районе // Мат-лы X Междунар. конф. по мерзлотоведению (ТИСОП) “Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире”. Т. 3. Тюмень: Печатник, 2012. С. 207–211.

Isakov V.A. Osnovnye tipy i prichiny razvitija deformacij avtomobil'nyh i zheleznyh dorog v Noril'skom promyshlennom rajone [Main types and causes of deformations on railways and roads in the Norilsk industrial district], Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost “Re-

sources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World”, Vol. 2, The Northern Publisher, Salekhard, 2012, pp. 133–136.

Исаков В.А., Наумов М.С., Телков Ф.С. Обследование грунтов основания на направлении Улак–Эльга // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 4. С. 28–31.

Isakov V.A., Naumov M.S., Telkov F.S. Obsledovanie gruntov osnovanija na napravlenii Ulak–Jel'ga [Investigation of railway Ulak–Jel'ga ground basement], Put' i putevoe hozjajstvo, 2013, no 4, pp. 28–31 (in Russian).

Исаков В.А., Телков Ф.С. Геокриологический мониторинг на объектах дорожной сети в криолитозоне России // Инженерные изыскания в строительстве: Мат-лы IX науч.-практ. конф. молодых специалистов. М.: ОАО “ПНИИИС”, 2013. С. 191–197.

Isakov V.A., Telkov F.S. Geokriologicheskij monitoring na ob'ektah dorozhnoj seti v kriolitozone Rossii [Monitoring of permafrost on Russian road network] Engineering investigations for construction: Proceedings of the Nine scientific-practice conference of young specialists, Moscow, ОАО “ПНИИИС”, 2013, pp. 191–197 (in Russian).

Каган А.А., Кривоногова Н.Ф. Многолетнемерзлые скальные основания сооружений. Л.: Стройиздат, 1978. 208 с.

Kagan A.A., Krivonogova N.F. Mnogoletnemerzlye skal'nye osnovanija sooruzhenij [Permafrost bedrock foundation], Stroyizdat, Leningrad, 1978, 208 p. (in Russian).

Канаев Ф.С. Инженерные изыскания на крайнем севере на основе ландшафтно-геокриологического метода. М.: Центр инжиниринга, маркетинга и рекламы “ТИМР”, 1994. 139 с.

Kanaev F.S. Inzhenernye izyskanija na krajnem severe na osnove landshaftno-geokriologicheskogo metoda. [Engineering investigations in arctic regions on a basis of landscape-geocryological methods], Centr inzhiniringa, marketinga i reklamy “TIMR”, Moscow, 1994, 139 p. (in Russian).

Кондратьев В.Г. Новые методы и технологии управления состоянием грунтов тела и основания земляного полотна железной дороги в криолитозоне // Геотехника. 2011. № 2. С. 28–39.

Kondrat'ev V.G. Nove metody i tehnologii upravlenija sostojaniem gruntov tela i osnovanija zemljanogo polotna zheleznoj dorogi v kriolitozone [New methods and technology



of control roadbed conditions in permafrost zone], *Geotekhnika*, 2011, no 2, pp. 28–39 (in Russian).

Криолитологическая карта СССР. 1:4 000 000, М.: ГУГК, 1985.

Kriolitologicheskaja karta SSSR. 1:4 000 000 [USSR Cryolithologic map 1:4 000 000], GUGK, 1985 (in Russian).

Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А. и др. Методика мерзлотной съемки. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 358 с.

Kudryavcev V.A., Garagulya L.S., Kondrat'eva K.A. et al. Metodika merzlotnoj s'emki [Methods of permafrost survey], Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow, 1979, 358 p. (in Russian).

Лисицына О.М., Минайлов Г.П., Романовский Н.Н., Пармузин С.Ю. Линейное строительство // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. С. 452–457.

Lisicyuna O.M., Minajlov G.P., Romanovskij N.N., Parmuzin S.Ju. Linejnoe stroitel'stvo [Linear construction], Geokriologija SSSR. Vostochnaja Sibir' i Dal'nij Vostok, Moscow, Nedra, 1989, pp. 452–457 (in Russian).

Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. 431 с.

Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyah / Pod red. V.A. Kudryavceva [Principals of geocryological forecast in the process of engineering-geological studies / Ed. by V.A. Kudryavcev], Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow, 1974, 431 p. (in Russian).

Пармузин С.Ю. Тепловая инерция многолетнемерзлых горных пород и их устойчивость к изменениям внешнего теплообмена // Основы геокриологии. Ч. 6. Геокриологический прогноз и экологические проблемы в криолитозоне / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. С. 108–121.

Parmuzin S.Ju. Teplovaja inercija mnogoletnemerzlykh gornyh porod i ih ustojchivost' k izmenenijam vneshnego teploobmena [Thermal inertia of frozen grounds and their stability under changing external heat transfer], *Osnovy geokriologii*, Vol. 6, Geokriologicheskij prognoz i ekologicheskie problemy v kriolitozone / Pod red. E.D. Ershova, Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow, 2008, pp. 108–121 (in Russian).

Региональная криолитология / Под ред. А.И. Попова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 256 с.

Regional'naja kriolitologija / Pod red. A.I. Popova [Regional cryolithology / Ed. by A.I. Popov], Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow, 1989, 256 p. (in Russian).

Строительные нормы и правила. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: ЦИПТ Госстроя СССР, 1990. 56 с.

Stroitel'nye normy i pravila. SNiP 2.02.04-88. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntah [Construction norms and regulations. SNiP 2.02.04-88. Basement and foundation on frozen ground], CIPT Gosstroja SSSR, Moscow, 1990, 56 p. (in Russian).

Строительные нормы и правила Российской Федерации. Железные дороги колеи 1520 мм. СНиП 32-01-95. М.: Минстрой России, 1995. 45 с.

Stroitel'nye normy i pravila Rossijskoj Federacii. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. SNiP 32-01-95 [Construction norms and regulations of Russian Federation. Railroads with rail gage 1520 mm. SNiP 32-01-95], Minstroy Rossii, Moscow, 1995, 45 p. (in Russian).

Строительные нормы и правила. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги. М.: ЦИПТ Госстроя СССР, 1987. 55 с.

Stroitel'nye normy i pravila. SNiP 2.05.02-85. Avtomobil'nye dorogi [Construction norms and regulations. SNiP 2.05.02-85. Roads], CIPT Gosstroja SSSR, Moscow, 1987, 55 p. (in Russian).

Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 541 с.

Hrustal'jov L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone [Principals of geotechnics in permafrost zone], Izd-vo Mosk. un-ta, Moscow, 2005, 541 p. (in Russian).

Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами "WARM" / Свидетельство № 940281. РосАПО, 1994.

Hrustal'jov L.N., Emel'janov N.V., Pustovojt G.P., Jakovlev S.V. Programma rascheta teplovogo vzaimodejstvija inzhenernykh sooruzhenij s vechnomerzlymi gruntami "WARM" / Svidetel'stvo № 940281 [Software for calculation thermal interaction between engineering structure and frozen grounds "WARM" / Patent N 940281], RosAPO, 1994 (in Russian).

Шаманова И.И., Титков С.Н., Максимов А.В. Техногенные изменения геокриологических условий железнодорожной линии Обская–Бованенково (полуостров Ямал) по результатам инженерно-геокриологического мониторинга // Мат-лы X Междунар. конф. по мерзловедению (ТИСОП): "Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире" Т. 5. Тюмень: Печатник, 2012. С. 337–339.

Shamanova I.I., Titkov S.N., Maksimov A.V. Tehnogennye izmeneniya geokriologicheskikh uslovij zheleznodorozhnoj linii Obskaya–Bovanenkovo (poluostrov Jamal) po rezul'tatam inzhenerno-geokriologicheskogo monitoringa [The anthropogenic changes in the geocryological conditions of the Obskaya-Bovanenkovo railway line (the Yamal peninsula) based on the results of the engineering and geocryological monitoring], Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost "Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World", Vol. 4. The Fort Dialog-Iset Publisher, Tyumen, Ekaterinburg, 2012, pp. 524–525.

Шполянская Н.А. Глобальные изменения климата и эволюция криолитозоны. М., 2008. 132 с.

Shpolyanskaja N.A., Global'nye izmeneniya klimata i jevoljucija kriolitozony [Global changes and evolution permafrost zone], Moscow, 2008, 132 p. (in Russian).

Поступила в редакцию  
27.11.2014

V.A. Isakov

## TEMPERATURE REGIME OF ROAD BASEMENTS IN THE PERMAFROST

The main trends and causes of the transformation of geocryological situation in the basements of road embankments within the permafrost zone are discussed. The temperature fields in the basements of 11 road embankments were modeled using the WARM software with due account of particular climatic and geocryological features. The modeling results made it possible to

identify four principal types of the long-term quasi-steady state of the temperature field in the road basements, namely stable, semi-stable, semi-unstable and unstable. The main causes of their formation, i.e. additional heating of artificial surfaces, redistribution of snow cover and road embankment morphology preventing the uniform freezing of ground at its bottom, are discussed. Specific irregularities of the temperature field influence seasonal and long-term dynamics of the geocryological conditions in the natural-technogenic system of road embankment. The modeling results were tested against the results of field observations and the data from publications with high degree of convergence. The regions with stable and semi-stable types of computed quasi-steady temperature field are also subjected to the deformation of road embankments as a result of the seasonal melting of ground at their bottoms and the intensification of thermokarst and frost heave processes.

*Key words:* permafrost zone, road embankment, modeling, regional variability.