

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 625.123: 624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50)

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ
В ОСНОВАНИИ НАСЫПЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ****Е.С. Ашпиз¹, Л.Н. Хрусталева²**¹ *Российский университет транспорта, Институт пути, строительства и сооружений,
127055, Москва, Минаевский пер., 2, Россия; geonika@inbox.ru*² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии,
119234, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; lev_kh@rambler.ru*

Рассмотрены особенности взаимодействия земляного полотна железных дорог с многолетнемерзлыми грунтами основания на примере линии Салехард–Надым, расположенной в субарктической зоне области распространения многолетнемерзлых грунтов. Показаны причины деградации многолетнемерзлых грунтов в основании земляного полотна и предложены способы их предотвращения.

Железная дорога, криолитозона, земляное полотно, основание, многолетнемерзлые грунты, предотвращение деградации

**PREVENTION OF DEGRADATION OF PERMAFROST SOILS
AT THE BASE OF RAILWAY EMBANKMENTS****E.S. Ashpiz¹, L.N. Khrustaleva²**¹ *Russian University of Transport, Institute of Track, Construction, and Structures,
2, Minaevskiy per., Moscow, 127055, Russia; geonika@inbox.ru*² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia; lev_kh@rambler.ru*

The features of the interaction of the railway roadbed with the permafrost soils of the base have been considered by the example of the Salekhard–Nadym line, located in the subarctic zone of the permafrost area. The reasons for the degradation of permafrost soils at the base of the roadbed have been revealed and the methods for their prevention have been suggested.

Railway, cryolithozone, roadbed, base, permafrost, prevention of degradation

ВВЕДЕНИЕ

Строительство железнодорожной линии “Северный широтный ход” (СШХ), которая в субарктической зоне должна соединить европейскую и азиатскую части России, предусматривается во всех стратегических документах, определяющих развитие транспортной системы страны на период до 2030 г. и утвержденных распоряжениями Правительства Российской Федерации. Частью СШХ является участок от Салехарда до Надыма протяженностью 335 км, по которому планируется интенсивное движение тяжелых поездов. Особенность линии в том, что она расположена в условиях Крайнего Севера.

Для территории, по которой будет проложена СШХ, характерны следующие природные условия. Длительная зима и ледостав – 240 дней, низкие температуры воздуха: зимой до -62°C , летом до $+36^{\circ}\text{C}$, среднегодовые температуры: в Надыме -5.5°C , в Уренгое -7.8°C . Скорость ветра до

24 м/с. Объем снеготранспорта составляет 400–600 м³ на 1 м, кроме того, длительность метелей в зимний сезон достигает 70 дней. Территория строительства характеризуется густотой рек, озерностью, заболоченностью и наледообразованием. На ней повсеместно распространены многолетнемерзлые грунты (ММГ) с температурой от -0.2 до -1.0°C . Высота снежного покрова, образующегося у земляного полотна, выше критической величины, при которой происходит оттаивание ММГ. Кондиционные грунты для строительства земляного полотна отсутствуют (преобладают мелкие и пылеватые пески). Ограниченны трудовые ресурсы из-за низкой плотности населения (менее 1 чел./км²).

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В субарктической зоне области распространения многолетнемерзлых грунтов (криолитозоны)



Рис. 1. Участок железнодорожной линии с осадками насыпи на линии Чум–Лабытнанги.

в эксплуатации ОАО “Российские железные дороги” находятся: на Северной железной дороге – линия Инта–Чум–Лабытнанги, построенная в 40-е гг. XX в., и на Свердловской железной дороге – линия Сургут–Коротчаево, построенная в 70-е гг. XX в. Характерной особенностью земляного полотна этих дорог является повышенная деформированность насыпей в виде неравномерных осадок (рис. 1), вызванная оттаиванием мерзлых грунтов основания, которое продолжается длительное время после строительства, приводя к значительным расстройкам рельсовой колеи и вызывая необходимость частых выправок и подъемов пути.

В результате этих деформаций безопасность движения поездов снижается, что приводит к значительному росту количества ограничений по скорости движения. Протяжение участков с деформациями осадок насыпей на этих участках приведено в табл. 1.

Основной причиной деформаций земляного полотна, сооруженного на ММГ, как показывают наблюдения, на первом этапе после строительства является деградация ММГ в его основании, вызванная нарушением естественных условий тепло-

обмена между атмосферой и грунтовым массивом [Ашпиз, 2016]. Для оценки изменения среднегодовой температуры грунта (t_{ξ} , °С) на подошве слоя сезонного оттаивания после сооружения земляного полотна можно воспользоваться методикой температурных поправок [Гарагуля, 1985]:

$$t_{\xi} \approx t_{\text{air}} + \Delta t_R + \Delta t_{\text{sn}} + \Delta t_{\text{veg}} + \Delta t_w + \Delta t_{\lambda} + \Delta t_{\text{in}} + \Delta t_{\text{cond}} + \Delta t_{\text{conv}}, \quad (1)$$

где t_{air} – среднегодовая температура воздуха, °С; Δt_R , Δt_{sn} , Δt_{veg} , Δt_w , Δt_{λ} , Δt_{in} , Δt_{cond} , Δt_{conv} – температурные поправки за счет влияния соответственно радиации, снежного и растительного покрова, открытых водоемов, изменения теплопроводности при промерзании и оттаивании, инфильтрации осадков, конденсации водяных паров в крупнообломочных грунтах и конвекции в порах воды и воздуха, °С.

Как видно из формулы (1), сооружение насыпи вносит изменения практически во все составляющие величины t_{ξ} . Рассмотрим, какие из этих поправок наиболее важны для условий субарктической зоны, где расположена линия Салехард–Надым. Особенностью субарктических районов является то, что они имеют тундровый ландшафт, для которого характерны сильные переносы снега во время метелей. При этом сооружение железнодорожной насыпи резко меняет отложения снега на ее поверхности, увеличивая толщину снега относительно естественных условий в нижней части откосов насыпи и в примыкающей к насыпи территории и оказывая тем самым сильное отпугивающее влияние на грунты основания. Натурные наблюдения показывают, что высота снега в месте сопряжения откоса насыпи с ее подошвой максимальна и в несколько раз превышает эту высоту в естественных условиях.

В табл. 2 дано распределение толщины снежного покрова и его плотности по откосу насыпи, полученные по результатам натурных наблюдений в конце зимы, проведенных сотрудниками Российского университета транспорта (МИИТ) на одной из опытных насыпей ПК 2, расположенной на 314-м километре железнодорожной линии Обская–Бованенково, высотой 2.8 м, с крутизной откосов 1:4. В табл. 2 приведены также вычислен-

Таблица 1. Протяжение участков железнодорожной линии с деформациями осадок насыпей в приполярной части России

Параметр	Северная ж/дорога	Свердловская ж/дорога
Протяжение, км		
пути	464	318
участков деформаций,	40.3	13.6
в том числе интенсивных с ограничением скорости	15.8	6.3
Относительное протяжение участков деформаций, %	8.7	4.2

Таблица 2. Изменение характеристик снежного покрова по откосу насыпи на конец зимнего периода

Точка измерения	Толщина, м	Плотность, кг/м ³	Термическое сопротивление, (м ² ·°С)/Вт
Верх откоса	0.31	360	0.784
Середина откоса	0.75	470	1.515
Подошва насыпи	1.23	550	2.159
Поле 5 м от подошвы	0.51	420	1.167
Естественные условия	0.21	310	0.634

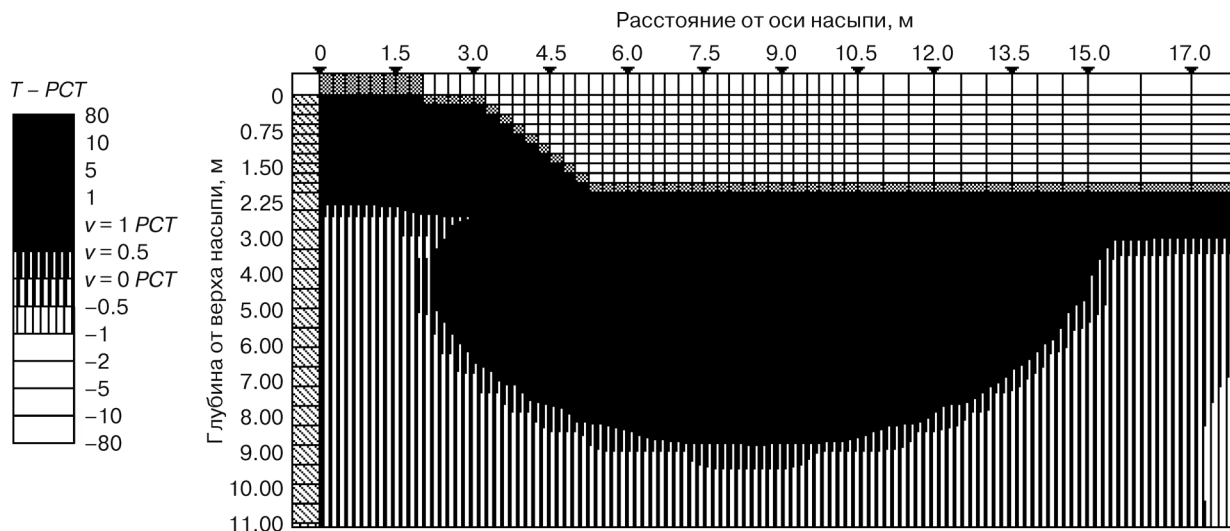


Рис. 2. Температурное поле под насыпью на 22-м километре линии Чум–Лабытнанги, сентябрь 2012 г.

Ось насыпи расположена слева на вертикальной оси.

T – температура грунта, °C; PCT – температура фазового перехода, °C; v – доля талой части грунта в блоке, д. е.

ные значения термических сопротивлений снежного покрова, которые существенно сокращают сезонное промерзание грунта.

Такое распределение снежного покрова по поперечному профилю насыпи приводит к тому, что в этих условиях в основании насыпи начинается деградация ММГ под нижней частью откосов насыпи и прилегающей к ней территорией. Экспериментальное подтверждение такого развития процесса деградации ММГ после сооружения земляного полотна было получено сотрудниками МИИТ в сентябре 2012 г. в ходе обследования деформирующихся насыпей линии Чум–Лабытнанги. В качестве примера на рис. 2 приведено температурное поле на сентябрь 2012 г. под насыпью высотой 2.5 м, расположенной на 22-м километре линии Чум–Лабытнанги. Температуры определены с помощью математического моделирования теплового процесса по программе WARM [Программа..., 1994]. Корректность моделирования подтверждена положением кровли ММГ на это время, установленным бурением (табл. 3).

Аналогичные положения кровли ММГ под насыпями с максимальным оттаиванием под точкой сопряжения откоса насыпи с естественной поверхностью грунта получены на Цинхай-Тибетской железной дороге в Китае [Xiaojuan Quan et al., 2009].

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ В ОСНОВАНИИ НАСЫПЕЙ

Как показал многолетний опыт строительства железных дорог, пренебрежение особенностями теплового взаимодействия земляного полотна с ос-

Таблица 3. Глубина залегания верхней границы ММГ в сентябре 2012 г.

Глубина залегания ММГ, м	Данные бурения	Данные моделирования
Обочина (2.5 м от оси пути)	5.0	6.6
Поле (9.5 м от оси пути)	5.5	6.5

Примечание. Глубина считается от поверхности грунта.

нованием из льдистых многолетнемерзлых грунтов приводит к серьезным деформациям, продолжающимся длительное время. Для рассматриваемого региона основным отепляющим фактором, вызывающим деградацию ММГ, является накопление снега (толщина которого превышает критическую величину) на откосах насыпи и сопряженных с ними частях естественной поверхности.

В настоящее время накоплен положительный опыт проектирования и строительства земляного полотна в этих условиях. Отработаны и прошли проверку на практике многие мероприятия по стабилизации земляного полотна, основными из которых, на наш взгляд, являются: применение сезонных охлаждающих установок совместно с бочковыми бермами и пологими откосами насыпи, а также укладка теплоизоляции на откосы насыпей [Аитиз и др., 2008; Чжан и др., 2018].

Кроме того, обязательными условиями являются надежная работа водоотводной системы и отсутствие вблизи насыпей термокарстовых понижений (последние, в случае наличия, должны быть засыпаны глинистыми грунтами).

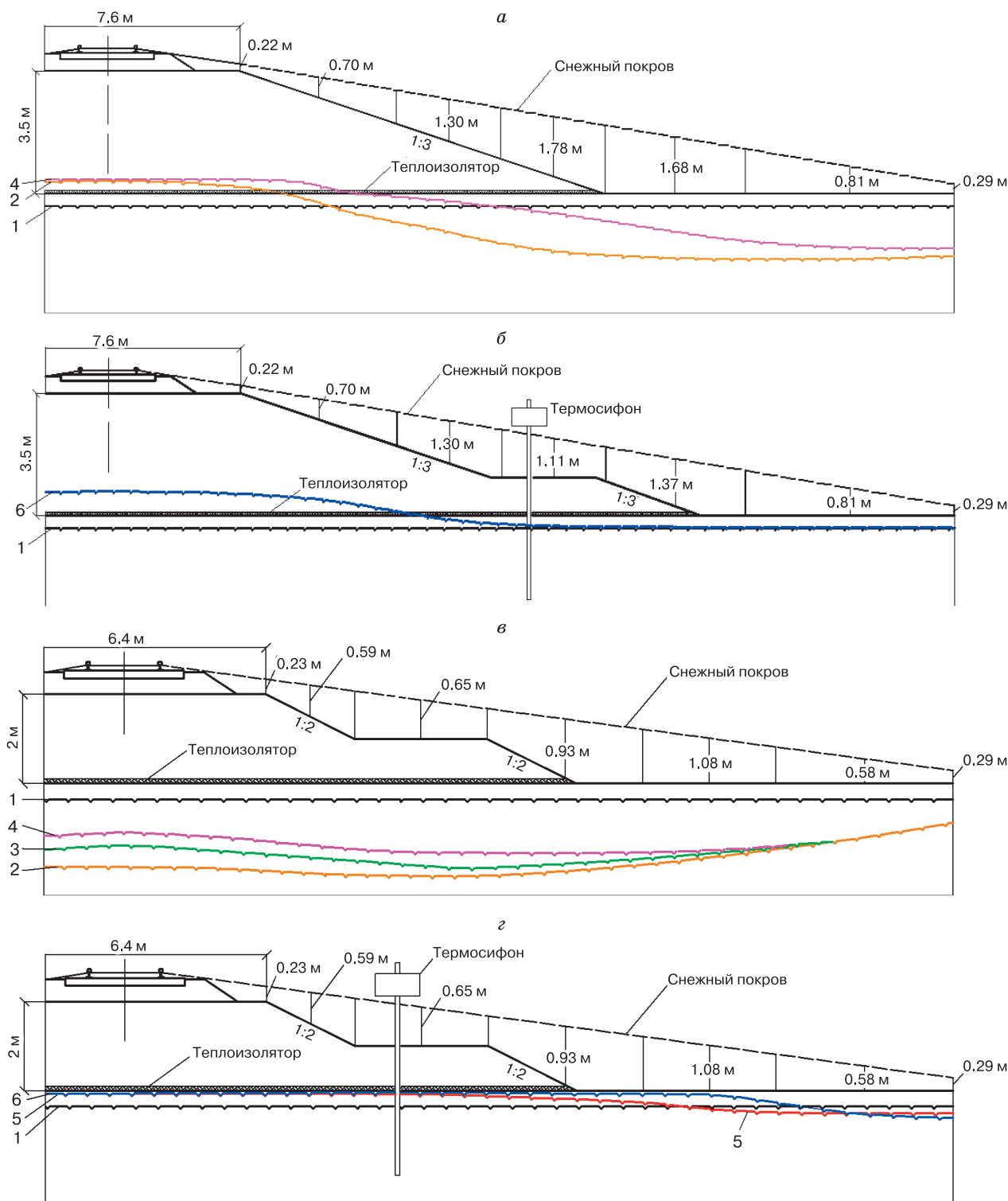


Рис. 3. Положение кровли ММГ на расчетных поперечниках линии Салехард–Надым:

а – ПК 3259, высота насыпи 3,5 м с теплоизолятором на подошве насыпи; *б* – то же, с термосифонами на бермах насыпи; *в* – ПК 2280, высота насыпи 2,0 м с теплоизолятором на подошве насыпи; *г* – то же, с термосифонами на бермах насыпи. 1 – кровля ММГ в естественных условиях до строительства; 2 – кровля ММГ через 50 лет после сооружения насыпи без мероприятий; 3, 4 – кровля ММГ через 50 лет после сооружения насыпи при наличии на подошве насыпи теплоизоляции из плит пенополистирола толщиной 5 и 10 см соответственно; 5, 6 – кровля ММГ через 50 лет после сооружения насыпи при наличии на подошве насыпи теплоизоляции из плит пенополистирола толщиной 5 и 10 см соответственно и термосифонов на бермах насыпи.

Исключение пучения земляного полотна больше допустимого достигается сокращением глубины сезонного промерзания грунтов основания за счет укладки под балластную призму теплоизоляции в виде пенополистирольных плит.

Для участков линии Салехард–Надым, расположенных на льдистых грунтах, авторами были разработаны поперечные профили насыпи высотой 3,5 м (ПК 3259+00), 2 м (ПК 2280+00) и 7 м (ПК 2690+00). Эти конструкции земляного полотна определялись из условия предотвращения деградации ММГ под насыпью на основе математического моделирования теплового взаимодействия насыпи

с окружающей средой по компьютерной программе WARM [Программа..., 1994]. Всего моделировалось 14 вариантов различных конструкций. В качестве граничных условий принимались данные наблюдений на метеостанции Надым, как более неблагоприятной для сохранения многолетней мерзлоты в основании железнодорожной линии по сравнению с метеостанцией Салехард. Распределение снежного покрова по профилю насыпи и на прилегающей территории выбиралось на основе наблюдений на линии Обская–Бованенково. Результаты моделирования с некоторыми принципиальными вариантами конструкций приведены на рис. 3, 4.

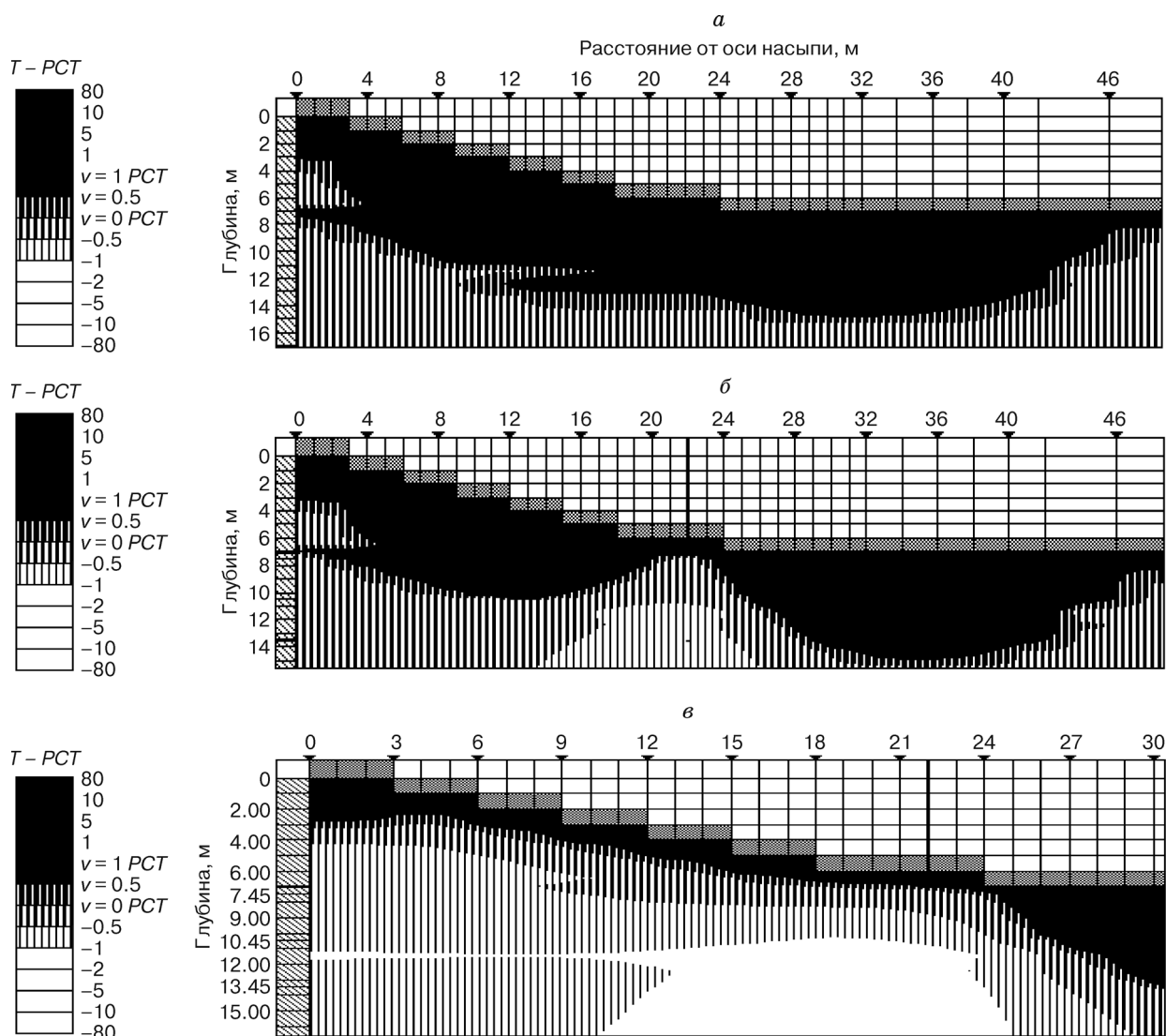


Рис. 4. Температурные поля через 50 лет после сооружения насыпи на ПК 2690 линии Салехард–Надым (высота насыпи 7 м).

a – температурное поле в теле и основании насыпи при наличии на подошве насыпи в пределах откосной части теплоизолятора из плит пенополистирола толщиной 5 см; *б* – температурное поле в теле и основании насыпи при наличии на подошве насыпи в пределах откосной части теплоизолятора из плит пенополистирола толщиной 5 см и термосифонов на бермах насыпи; *в* – температурное поле в теле и основании насыпи при наличии на поверхности откосов и брем теплоизолятора из плит пенополистирола толщиной 6 см и термосифонов на бермах насыпи.

Наиболее эффективными в условиях линии Салехард–Надым для предотвращения деградации мерзлоты оказались два варианта: 1) устройство у подошвы насыпи бERM высотой 1.5–2.0 м с установкой на них термосифонов; 2) укладка по откосу насыпи теплоизолятора, за исключением насыпей высотой менее 2 м, что меньше глубины сезонного промерзания, и в этих условиях предпочтительнее по технологии укладка теплоизолятора на подошве насыпи.

ВЫВОДЫ

Расчеты показывают, что во всех случаях, когда теплоизолятор укладывается на подошве насыпи, а на бERмах отсутствуют термосифоны, в откосной части земляного полотна и на прилегающей к ней территории происходит многолетнее оттаивание грунтов, которое неизбежно приведет к термокарсту, учитывая наличие в основании насыпи высокольдистых грунтов. Избежать оттаивания можно, установив бERмы и установив по ним термосифоны вдоль оси пути, а также положив на подошву насыпи или под крепление откосов теплоизолятор. В этом случае в теле и основании насыпи будет происходить только сезонное оттаивание грунтов, которое к середине зимы будет исчезать. При этом в пределах основной площадки оно затронет грунты основания не более чем на 20 см, а в откосной части земляного полотна не выйдет за пределы сезонного оттаивания грунтов в естественных условиях.

Литература

- Ашпиз Е.С. Опыт проектирования земляного полотна железных дорог России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Универ. книга, 2016, т. 1, с. 162–168.
- Ашпиз Е.С., Хрусталеv Л.Н., Емельянова Л.В., Ведерникова М.А. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 84–89.

Гарагуля Л.С. Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий (на примере равнинных территорий). М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 224 с.

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

Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталеv Л.Н., Шестернев Д.М. Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 3, с. 67–71.

Xiaojuan Quan, Bo Gao, Qian Su. Stability of slope embankment in permafrost regions // Proc. of the Eighth Intern. Symposium on Permafrost Engineering (Xi'an, 15–17 Oct., 2009). Xi'an, China, 2009, p. 181–186.

References

- Ashpiz E.S. Experience in designing the subgrade for Russian railways in located permafrost regions. In: Proc. of the Fifth Conf. of Geocryologists (Moscow, June 14–17, 2016). Moscow, Universitetskaya Kniga, 2016, vol. 1, p. 162–168 (in Russian).
- Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Emelyanova L.V., Vedernikova M.A. Using of synthetic thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2008, vol. XII, No. 2, p. 84–89 (in Russian).
- Garagulia L.S. Metodika prognoznoy ostenki antropogennyx izmenenii merzlotnyx yslovii (na primere ravninyx territorii) [The Methodology for predictive assessment of anthropogenic changes in permafrost conditions (using the example of flat territories)]. Moscow, Moscow University Press, 1985, 224 p. (in Russian).
- Programma rascheta teplovogo vzaimodeistvia ingnerynyx soorygenii s vechnomerzlymi gryntami WARM [The Program for calculating the thermal interaction of engineering structures with permafrost soils WARM] / Khrustalev L.N., Emelyanov N.V., Pustovoyt G.P., Yakovlev S.V. Patent 940281; Published by RosAPO. 1994 (in Russian).
- Zhang A.A., Ashpiz E.S., Khrustalev L.N., Shesternev D.M. A new way for stabilization of permafrost under railway embankment. Earth's Cryosphere, 2018, vol. XXII, No. 3, p. 59–62.
- Xiaojuan Quan, Bo Gao, Qian Su. Stability of slope embankment in permafrost regions. In: Proc. of the Eighth Intern. Symposium on Permafrost Engineering (Xi'an, 15–17 Oct., 2009). Xi'an, China, 2009, p. 181–186.

*Поступила в редакцию 2 марта 2020 г.,
после доработки – 23 мая 2020 г.,
принята публикации 12 июля 2020 г.*