

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ  
В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.34:624.139

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(67-71)

НОВЫЙ СПОСОБ ЗАЩИТЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
ОСНОВАНИЯ НАСЫПИ ОТ ОТТАИВАНИЯА.А. Чжан<sup>1</sup>, Е.С. Ашпиз<sup>2</sup>, Л.Н. Хрусталева<sup>1</sup>, Д.М. Шестернев<sup>3</sup><sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии, 119234, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; zhang.andrew.msu@gmail.com<sup>2</sup> Московский государственный университет путей сообщения, Институт пути, строительства и сооружений, кафедра "Путь и путевое хозяйство", 127055, Москва, Минаевский пер., 2, Россия<sup>3</sup> Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

Предложенный способ защиты грунтов основания насыпи от оттаивания предусматривает укладку синтетического теплоизолятора на откосы насыпи. Это создает охлаждающий эффект и способствует перемещению кровли толщи многолетнемерзлых грунтов из основания в тело насыпи, что подтверждается геофизическими исследованиями на экспериментальном участке действующей в криолитозоне железнодорожной магистрали. Способ характеризуется лучшими экономическими показателями, чем известные средства охлаждения основания насыпи.

*Насыпь, основание, криолитозона, кровля толщи многолетнемерзлых грунтов, охлаждающий эффект, геофизические исследования, экономические показатели*

A NEW WAY FOR THERMAL STABILIZATION OF PERMAFROST  
UNDER RAILWAY EMBANKMENTA.A. Zhang<sup>1</sup>, E.S. Ashpiz<sup>2</sup>, L.N. Khrustaleva<sup>1</sup>, D.M. Shesternev<sup>3</sup><sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119234, Russia; zhang.andrew.msu@gmail.com<sup>2</sup> Moscow State University of Railway, Institute of Track, Construction, and Structures, Department of Track and Track Facilities, 2, Minaevskiy per., Moscow, 127055, Russia<sup>3</sup> Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia

It is suggested to prevent permafrost thawing under railroad embankments by laying a geosynthetic heat insulator on the slopes. The insulation creates a cooling effect whereby the permafrost table moves upward from the embankment base to its body. The thaw depth reduction is confirmed by geophysical surveys at a test segment of a railway operated in a permafrost area. The new method has better economic performance than other known ways of thermal stabilization.

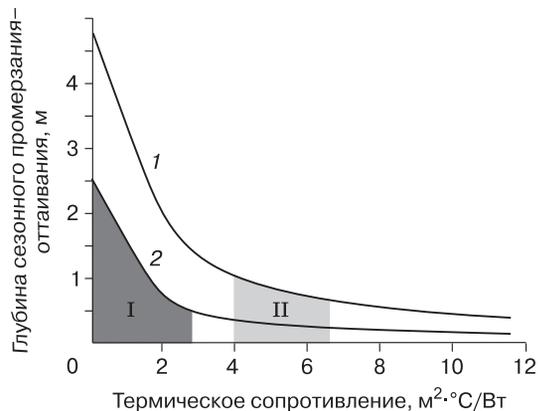
*Embankment, subgrade, permafrost, permafrost table, cooling effect, geophysical survey, economic performance*

## ВВЕДЕНИЕ

Способ разработан в 2008 г. как средство борьбы с многолетним оттаиванием мерзлых пород в основании железнодорожных и автомобильных насыпей [Патент..., 2008]. Он заключается в расположении синтетического изолятора по откосам насыпи, что приводит к увеличению слоя сезонного промерзания откоса над слоем его сезонного оттаивания и вызывает охлаждающий эффект. Синтетический теплоизолятор укладывается под "одежду" откоса и крепится на откосе с помощью металлических шпилек. Способ прошел успешное испытание на одном из участков Амуро-Якутской магистрали в 2009–2016 гг.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Теория вопроса была подробно изложена авторами ранее [Ашпиз и др., 2008], здесь напомним только некоторые ее положения. На рис. 1 приведена зависимость глубины промерзания–оттаивания от термического сопротивления дневной поверхности. Благодаря сезонным изменениям условий теплообмена Земля летом поглощает тепло, зимой – отдает его. Летнее поглощение тепла выражается в оттаивании деятельного слоя и повышении температуры верхних слоев многолетнемерзлой толщи. Зимой отдача тепла Землей выражается в том, что сначала промерзает деятельный слой, а затем охлаждаются верхние слои много-



**Рис. 1. Зависимость глубины сезонного промерзания–оттаивания от термического сопротивления поверхности.**

1 – промерзание; 2 – оттаивание. Области увеличения термического сопротивления поверхности откоса: I – в теплый период; II – в холодный период.

летнемерзлой толщи. Условием сохранения мерзлого состояния планеты является систематическое ежегодное превышение теплоотдачи над теплоприходом. Мерзлое состояние грунтов сохраняется, если потенциальная глубина сезонного промерзания  $h_f$  (промерзание при условии, что весь массив грунта талый) превышает глубину летнего оттаивания  $h_i$ :  $M = \frac{h_f}{h_i} \geq 1$ , и, наоборот, при  $M < 1$

происходит многолетнее оттаивание вечномерзлых грунтов. Параметр  $M$  (отношение глубины сезонного промерзания к глубине сезонного оттаивания) впервые ввел Н.А. Цытович в 1928 г. [Цытович, 1928]. Цель настоящей работы – сократить глубину летнего оттаивания на откосе земляного полотна, оставив практически без изменения глубину зимнего промерзания.

Из рис. 1 следует, что с ростом термического сопротивления на поверхности откоса при его малых начальных значениях (летом) существенно больше сокращается глубина оттаивания, чем глубина промерзания при высоких значениях (зимой), когда на откосе лежит снег. Таким образом, укладывая на откос теплоизолятор, мы увеличиваем параметр  $M$ , причем тем сильнее, чем больше снега на откосе. При определенной толщине теплоизоляции параметр  $M$  может превысить единицу и откос вместо отепляющего будет оказывать охлаждающее действие. Добиться охлаждающего эффекта можно всегда, если на откосе лежит снег. При этом толщина теплоизоляции обратно пропорциональна его мощности. Этот на первый взгляд парадоксальный факт демонстрируют графики, построенные для насыпи, расположенной в районе пос. Анадырь (см. рис. 1). Заметим, что ес-

ли на откос положить синтетический теплоизолятор, например экструдированный пенополистирол толщиной 10 см, то величина  $M$  резко возрастет с 0.4 до 1.4. В первом случае на откосе отсутствует теплоизолятор, поэтому он оказывает отепляющее действие, во втором – на откос положен теплоизолятор, который охлаждает основание насыпи.

Чтобы определить необходимую толщину изоляции на откосе для достижения охлаждающего эффекта, авторами выполнено математическое моделирование теплового взаимодействия поверхности откоса с грунтами земляного полотна с использованием компьютерной программы WARM [Программа..., 1994]. В качестве объектов моделирования выбраны 7 метеостанций в пурговых районах (Хоседа-Хард, Хатанга, Агата, Анадырь, Ямаск, Салехард, Палатка) и 6 метеостанций в морозных районах (Марково, Суусман, Аллах-Юн, Чульман, Иркутск, Чукурдах). К пурговым относятся районы со средней зимней скоростью ветра более 4 м/с, к морозным – со скоростью равной или менее 4 м/с. В результате моделирования получены следующие корреляционные связи между расчетной температурой поверхности откоса и безразмерным параметром  $M$ :

$$\text{пурговые районы: } T_{de} = -5.51M + 6.64 \quad (n = 56, r = -0.938),$$

$$\text{морозные районы: } T_{de} = -7.76M + 7.68 \quad (n = 48, r = -0.957),$$

где  $T_{de}$  – расчетная температура грунта на поверхности откоса (среднегодовая температура грунта на подошве деятельного слоя), °С;  $n$  – объем выборки;  $r$  – коэффициент корреляции.

Таким образом, корреляционная связь в обоих случаях тесная. (Напомним, что в статистике зависимость считается значимой, если абсолютная величина коэффициента корреляции превышает 0.7.)

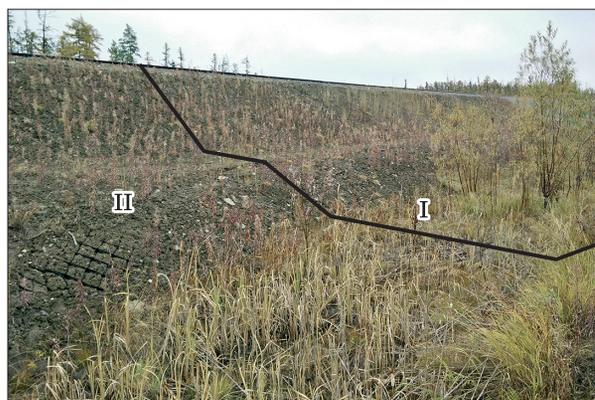
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность предлагаемого способа исследовалась на участке Амура-Якутской магистрали (695-й километр). Протяженность участка 80 м. Он расположен в юго-восточной части Сибирской платформы в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность мерзлой толщи здесь составляет 200 м. Температура ММП изменяется от  $-2.0$  до  $-2.2$  °С. Отличительной особенностью мерзлых пород на этом участке является то, что они содержат мощные повторно-жильные льды, залегающие на глубине 2–5 м от дневной поверхности. Криотекстура вмещающих пород: линзовидно-слоистая, массивная и массивно-поровая. Весовая влажность колеблется в пределах 25–63 %. Мощность высокольдистых грунтов достигает 10 м и более.



**Рис. 2. Экспериментальный участок насыпи на 695-м километре Амуро-Якутской магистрали (фото А.А. Чжана, 2015 г.).**

1 – теплоизолятор (экструдированный пенополистирол); 2 – закрепляющие металлические шпильки; 3 – объемная пластмассовая сетка.



**Рис. 3. Расположение условной линии георадиолокационного профиля (I) на экспериментальном участке.**

II – откос земляного полотна с теплоизоляцией, покрытый защитной сеткой с заполнением грунта.

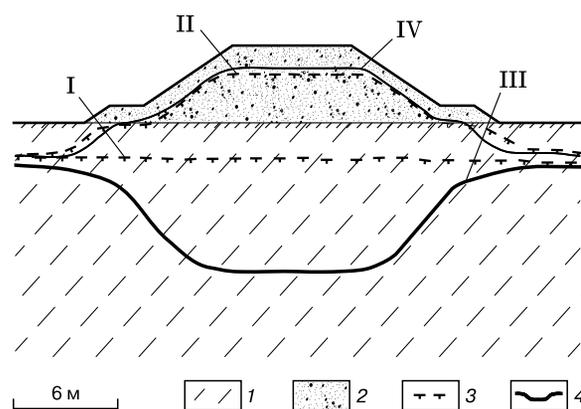
Экспериментальный участок представляет собой насыпь высотой 4,5 м. Заложение откосов 1:1,5. На откосах имеются две бермы высотой 1 м. Ширина основной площадки 7 м, берм – 2 м. Теплоизолятор (экструдированный пенополистирол) толщиной 5 см укладывался на откос и закреплялся металлическими шпильками (рис. 2). Его толщина была определена согласно проектному решению. По поверхности теплоизолятора раскатывалась объемная пластмассовая сетка, которая заполнялась почвой с посевом многолетних трав. В отдельных случаях вместо объемной сетки применялась плоская сетка, поверх которой отсыпалась указанная почва.

Наблюдения за температурным режимом грунтов тела и основания насыпи предполагалось вести по температурным профилям, для чего было пробурено и оборудовано несколько термометрических скважин, расположенных около тела насыпи. Из-за введения железной дороги во временную эксплуатацию скважины в теле насыпи отсутствуют, поэтому в 2016 г. Институтом мерзлотоведения СО РАН были проведены геофизические исследования методом георадиолокации на одном из температурных профилей с целью определения положения кровли ММП (рис. 3) [Христофоров и др., 2016; Шестернев и др., 2017].

На рис. 4 показано положение кровли многолетнемерзлых грунтов на момент исследований (2016 г.) по данным георадиолокации (кривая II) и начальное положение кровли (2009 г.) по данным температурных измерений (кривая I). Для сравнения кривой IV представлено положение кровли на момент исследований (2016 г.) по ре-

зультатам математического моделирования при наличии на откосе теплоизоляции, кривой III – при ее отсутствии. Почвенно-растительный слой при моделировании не учитывался.

Видно, что результаты геофизических исследований и математического моделирования (кривые II и IV соответственно) практически совпадают. Оценить реальную эффективность способа можно сопоставляя кривые II и III.



**Рис. 4. Положение кровли толщи многолетнемерзлых грунтов в теле и основании насыпи на экспериментальном участке:**

I – до возведения насыпи на август 2009 г.; II – по данным георадиолокации на июль 2016 г.; III, IV – по данным математического моделирования на июль 2016 г. (III – при отсутствии теплоизоляции, IV – с теплоизоляцией). 1 – суесь; 2 – гравелисто-песчаный грунт; 3, 4 – положение кровли толщи многолетнемерзлых грунтов (3 – по данным натуральных измерений, 4 – по данным математического моделирования).

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО СПОСОБА

Оценена экономическая выгода использования предложенного способа в сравнении с другими известными средствами: каменной наброской на откос, установкой на откосе вентиляционных коробов, установкой на бермах насыпи вертикальных термосифонов. При этом конструктивные параметры сравниваемых способов устанавливались расчетом для климатических и грунтовых условий экспериментальных участков. Расчет производился на 10 м одной стороны трассы. Его результаты представлены в таблице.

Из приведенных в таблице данных следует, что по стоимости материала охлаждающие устройства располагаются в порядке возрастания: тепло-

изоляция – термосифоны – каменная наброска – вентиляционные короба. При определении стоимости мы ориентировались на средние цены материала в России по данным прайс-листов производителей и поставщиков на 2014–2016 гг. Однако, чтобы говорить об экономической целесообразности того или иного мероприятия, необходимо иметь данные по затратам на перевозку материала и его укладку или установку в тело насыпи. К сожалению, такими данными авторы не располагают. В то же время можно с уверенностью утверждать, что теплоизолятор будет оптимальным решением, поскольку ему соответствуют наименьшее число тонно-километров при перевозке и наименьшие трудозатраты при монтаже на откосе насыпи.

Сравнение стоимости материалов различных способов охлаждения основания насыпи

№ п/п	Охлаждающие устройства	Общий объем, м <sup>3</sup>		Средняя цена за 1 м <sup>3</sup> , руб.		Общая стоимость, руб.
		коробов	термосифонов	лотка по длине откоса	термосифона длиной 8.5 м	
1	Теплоизолятор из пенополистирола по всей длине откосов, включая бермы	5.06		4800		24 288
2	Каменная наброска по всей длине откоса, включая бермы	91.0		1300		118 300
		Количество на 10 пм, шт.		Стоимость, руб.		Общая стоимость, руб.
3	Вентиляционные короба (лотки)* по всей длине откосов, включая бермы (ширина 0.3 м, расстояние 0.4 м)	14	–	9400	–	131 600
4	Вертикальные термосифоны на берме насыпи (радиус 0.035 м, длина 8.5 м, шаг 1.6 м)	–	6	–	9837	59 022

\* Стоимость лотка Л 1-8/2 на длину откоса – 5200 руб., лотка Л 1д-8 – 4200 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый способ защиты мерзлого основания насыпи от оттаивания, предусматривающий укладку на откосы насыпи синтетического теплоизолятора, что при наличии на откосах снега вызывает охлаждающий эффект.

2. Новый способ имеет следующие преимущества перед известными: большая долговечность способа защиты мерзлого основания от оттаивания; его высокая надежность; низкая стоимость реализации способа; простота монтажа и ремонтнопригодность строительных конструкций.

Широкое внедрение предлагаемого способа в практику станет новым этапом технического прогресса в дорожном строительстве.

## Литература

Патент № 2242813. Дорожная насыпь на вечномерзлых грунтах / Ашпиз Е.С., Лукин М.П., Хрусталеv Л.Н., Шоллин В.В. Оpubл. 2008; Бюл. № 13.

Ashpiz, E.S., Lukin, M.P., Khrustalev, L.N., Sholin, V.V., 2008. Railroad Embankment on Permafrost. Patent No. 2242813. Published, Bull. No. 13. (in Russian)

**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. XIII, № 2, с. 84–89.

Ashpiz, E.S., Khrustalev, L.N., Emelyanova, L.V., Vedernikova, M.A., 2008. Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment. Earth's Cryosphere XII (2), 84–89.

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

Khrustalev, L.N., Emelyanov, N.V., Pustovoit, G.P., Yakovlev, S.V., 1994. The WARM Software for Modeling Thermal Interaction of Engineering Structures with Permafrost. Certificate No. 940281; Published by RosAPO. (in Russian)

**Христофоров И.И., Чжан А.А., Омельяненко П.А., Литовко А.В.** Опыт применения метода георадиолокации при исследовании основания железнодорожной насыпи в усло-

виях криолитозоны // Материалы Всерос. конф. научной молодежи / Под ред. А.Г. Федорова и др. Якутск, Изд. дом СВФУ, 2016, с. 169–173.

Khristoforov, I.I., Zhang, A.A., Omelyanenko, P.A., Litovko, A.V., 2016. Experience of using GPR in scanning permafrost ground under railway embankments, in: Proc. All-Russian Early Carrier Conf., SVFU Publishers, Yakutsk, pp. 169–173. (in Russian)

**Цытович Н.А.** К вопросу расчета фундамента сооружений, возводимых на вечной мерзлоте. Л., Гипромез, 1928, 27 с.

Tsytovich, N.A., 1928. Design of Basements on Permafrost. Gipromez, Leningrad, 27 pp. (in Russian)

**Шестернев Д.М., Литовко А.В., Чжан А.А.** Опыт проектирования и строительства на участке ледовый комплекс Амуро-Якутской железнодорожной магистрали // Наука и образование, 2017, № 2, с. 28–33.

Shesternev, D.M., Litovko, A.V., Zhang, A.A., 2017. Experience in design and construction within the ice complex of the Amur-Yakutsk Railway. Nauka i Obrazovanie, No. 2, 28–33.

*Поступила в редакцию  
23 мая 2017 г.*