

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.340:624.139

ДЕФОРМАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
НА УЧАСТКЕ НОРИЛЬСК–ТАЛНАХ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМИ

В.И. Гребенец, В.А. Исаков

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
кафедра криолитологии и гляциологии, 119234, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; isakov.gc@gmail.com*

На основании маршрутных наблюдений, изучения фондовых материалов и теплофизического моделирования рассмотрены главные причины развития деформаций автомобильной и железной дорог на участке Норильск–Талнах. Выявлены основные (характерные для данных объектов) деформации дорожного полотна, предложено объяснение их генезиса и методы стабилизации деформирующихся участков. Установлено, что основной причиной развития деформаций железных и автомобильных дорог на участке Норильск–Талнах является развитие подтопления и термокарста, а также конструктивные недостатки линейных сооружений.

*Криолитозона, земляное полотно, деформации, осадка насыпи, термокарст*

DEFORMATIONS OF ROADS AND RAILWAYS WITHIN  
THE NORILSK–TALNAKH TRANSPORTATION CORRIDOR AND THE STABILIZATION METHODS

V.I. Grebenets, V.A. Isakov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology,  
119234, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; isakov.gc@gmail.com*

The paper considers the key factors causing the deformations of the roads and railways between the city of Norilsk and Talnakh. The factors are deduced via the on-ground field surveying, thermophysical modeling and analysis of other topic related research materials. As the result, the authors have determined the main types of deformation, providing the explanation to their genesis. The authors also have suggested the geotechnical methods for controlling and stabilizing the road deformations. The main reasons, causing the road deformations in Norilsk–Talnakh area, are the processes of thermokarst and waterlogging along with geotechnical flaws of design.

*Permafrost, roadbed, deformations, embankment displacement, thermokarst*

ВВЕДЕНИЕ

Деформации автомобильных и железных дорог в криолитозоне являются серьезной проблемой при освоении северных территорий нашей страны, особенно при эксплуатации в сложных мерзлотно-грунтовых условиях. Натурные наблюдения на Байкало-Амурской и Транссибирской магистралях, в Тибете и на Алтае показали чрезмерно быстрое ухудшение качества земляных оснований, выявили активизацию опасных экзогенных процессов, снижение геотехнической безопасности автомобильных и железных дорог [Минкин, Чижов, 1989; Перетрухин, Потатуева, 1989; Розенберг, 1989; Шестернев, Чащина, 1989; Оспенников, 2000; Кондратьев, 2011, 2012; Исаков и др., 2013]. Максимальные деформации железнодорожного полотна зафиксированы для так называемой “мертвой дороги” (“стройки 501 и 503”) от

Салехарда до Ермаково-Игарки, строительство которой и эксплуатация отдельных участков были прекращены в 1953 г. [Полярная магистраль..., 2007]. Большие проблемы с прокладкой и надежностью эксплуатации обнаружены при проведении геотехнического мониторинга на трассе “Обская–Бованенково” на Ямале в 2007 г. [Цветкова, 2008; Панченко, 2009]. Актуальность исследования проблемы деформаций дорожного полотна в Норильском промышленном районе обусловлена сложностью природных условий и длительной историей его освоения, важной частью которой было дорожное строительство.

Норильский промышленный район – один из крупнейших индустриальных центров на территории криолитозоны. Наиболее загруженными являются дороги, связывающие крупнейшие насе-

ленные пункты и промышленные центры – Норильск, Талнах и Дудинку. Деформации дорожного полотна и насыпей Норильского промышленного района под действием криогенных процессов приводят к уменьшению пропускной способности дорог и снижению безопасности их эксплуатации.

### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Норильский промышленный район отличается суровым климатом и сложными инженерно-геокриологическими условиями. Среднегодовая температура воздуха составляет  $-9.4^{\circ}\text{C}$ , характерны большие снеготаносы и активный метелевый перенос [Справочник..., 1977]. Основанием линейных сооружений служат отложения Вальковской озерно-аллювиальной террасы – льдистые ( $I = 0.3-0.6$ ) [Демидюк, 1989б] дисперсные (преимущественно суглинистые и глинистые) грунты, содержащие пластовые и повторно-жильные льды. Мощность льдистых отложений может достигать нескольких десятков метров. Температура грунтов в естественных условиях на глубине нулевых амплитуд изменяется от  $0^{\circ}\text{C}$  (на границе таликовых зон, в том числе у берегов р. Норильская) до  $-3...-5^{\circ}\text{C}$  [Демидюк, 1989а], на тех участках, которые непосредственно прилегают к дорожной сети (например, пансионат “Оль-Гуль” близ пос. Валёк), температура вечномерзлых грунтов (ВМГ) не опускается, как правило, ниже  $-2^{\circ}\text{C}$  [Гребенец, Ухова, 2008]. Около 30 % площади региона занимают таликовые зоны [Шевелева, Хомичевская, 1967], приуроченные к руслу р. Норильская и крупнейшим термокарстовым или унаследованным озерам, причем часть этих озер примыкает непосредственно к насыпям дорог. Высокая активность термокарстовых процессов обуславливает основную черту микрорельефа Вальковской террасы – чередование термокарстовых котловин и останцовых (термоплатационных) поверхностей. В ходе маршрутных обследований вдоль автомобильной и железной дорог зафиксировано значительное количество небольших озер, образование которых вызвано подпруживанием насыпью временных водотоков и особенно участков активного грунтового стока. Измеренная глубина этих озер (в августе–сентябре) в большинстве случаев превышала критическую для данного района величину –  $0.75\text{ м}$  [Демидюк, Лебедева, 1977], что позволяет предполагать активизацию термокарста.

### ИСТОРИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие транспортной сети осуществлялось синхронно с индустриальным освоением Норильского региона: в середине 1930-х гг. были проло-

жены железная и грунтовая дороги от пристани Валёк до Норильска (в конце 1930-х гг. была построена железная дорога Дудинка–Норильск). В 1960-е гг. в связи с освоением руд Талнаха автомобильная и железная дороги были продлены до строящегося города. В 1963 г. введен совмещенный автомобильный и железнодорожный мостовой переход через р. Норильская, причем в конце 1970-х сверху конструкций моста были проложены трубы пульпопровода, на 40 т увеличившие нагрузку на основание мостового перехода. Характерно, что левый устой моста, начиная с возведения и до 1980-х гг. (устройство системы парожидкостных сезонноохлаждающих устройств (СОУ), вмороживших устой в берег), испытывал значительные деформации [Гребенец и др., 1999]. Существовавшие ранее участки дорог были реконструированы: трасса железной дороги была спрямлена, а на автомобильной дороге появилось асфальтовое покрытие.

На всем протяжении железная и автомобильная дороги, связывающие Норильск и Талнах, идут по насыпям. Высота насыпи изменяется на различных участках от  $1.0-1.2$  до  $18-20\text{ м}$ . Насыпь автомобильной дороги (по сравнению с железной) имеет в основном существенно меньшую высоту (в среднем  $4-6\text{ м}$ ). В качестве материала для насыпей использованы природные щебенчатые грунты с заполнителем (до  $30-40\%$ ) из дресвы, песка, супеси или металлургический шлак с мелкоземом; отсутствует конвекция холодного воздуха внутри насыпи. Большая ширина насыпей по подошве, доходящая на некоторых участках до  $60-80\text{ м}$ , способствует формированию обширных зон подтопления у откосов насыпи. Вдоль насыпей дорог отсутствуют доступные для наблюдений термометрические скважины.

Проблема обеспечения устойчивости линейных сооружений в Норильском регионе весьма актуальна [Гребенец и др., 1999; Grebenets et al., 1999]. Однако без точной проработки вопроса о причинах развития деформаций меры, принимаемые для стабилизации оснований дорог, не всегда обеспечивают длительную безопасность их эксплуатации. Дифференциация деформаций по основным типам (морфологическим и генетическим) позволит более рационально и эффективно проводить работы по обеспечению надежности грунтов основания дорожной сети.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В августе–сентябре 2010 г., а также в июле 2011 г. проведены натурные обследования  $15\text{ км}$  железных и  $19\text{ км}$  автомобильных дорог, связывающих Норильск и Талнах. Исследования включали маршрутные наблюдения, изучение космических снимков территории и анализ фондовых материалов (2006 г.), предоставленных Управлением

эксплуатации автодорог и снегоборьбы г. Норильска. В ходе маршрутных наблюдений фиксировались характер и масштаб деформаций полотна дорог, оценивались состояние искусственных сооружений и развитие экзогенных, в том числе криогенных, процессов на насыпи и прилегающих территориях. Космические снимки использовались для определения конфигурации зон подтопления и участков поражения опасными криогенными процессами. Анализ фондовых материалов позволил оценить динамику и повторяемость деформаций на различных участках дороги.

В связи с отсутствием информации по температуре грунтов для исследуемых объектов выполнялось моделирование температурного поля в основании земляного полотна в программе “WARM” [Программа..., 1994]. Подготовка и расчет климатических и других данных, необходимых для моделирования, проводились согласно методике, предложенной Л.Н. Хрусталевым [1999]. Среднемесячные температуры искусственных и естественных поверхностей, принятые для расчета, приведены в табл. 1. В зимние месяцы для откосов и прилегающей территории указана температура поверхности снежного покрова.

Для основной площадки насыпи альбедо имеет значение 0.1 (асфальтобетонное покрытие и сильнозагрязненная нефтепродуктами балластная призма), для откосов это значение составляло 0.14 (щебеночное покрытие). Распределение снежного покрова принималось исходя из условия 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 проведении моделирования не учитывалось влияние метелевого переноса на мощность снега. Ввиду отсутствия данных о плотности снеж-

Таблица 1. Среднемесячная температура искусственных и естественных поверхностей

Год*	Месяц	Температура поверхности*, °С	Месяц	Температура поверхности*, °С
-9.4; -7.9; -7.5	1	-26.9	7*	14.3; 19.0; 20.4
	2	-27.2	8*	11.4; 15.5; 16.9
	3	-21.9	9*	4.0; 7.7; 9.1
	4	-13.9	10	-9.5
	5	-4.8	11	-20.2
	6*	7.0; 12.1; 13.4	12	-25.1

\* Температура естественной поверхности/температура поверхности откоса без учета фактора экспозиции/температура поверхности основной площадки.

ного покрова на откосах насыпи и прилегающей к ней территории среднемесячная плотность снега принималась по таблице, предложенной В.А. Кудрявцевым с соавторами [Методика..., 1979]. Плотность снега в весенний период, когда уменьшается толщина снежного покрова, принята равной максимальной для зимнего периода.

Моделирование температурного поля проводилось для насыпей различной высоты (2, 6 и 10 м) с шириной основной площадки 9 м, откосами крутизной 1:1.5 и шириной основания насыпи 15, 27 и 39 м соответственно. Моделирование осуществлялось для насыпей, сложенных гравийно-щебеночной смесью, песком мелким и пылеватой супесью. Верхний горизонт насыпи мощностью 1 м во всех случаях был представлен балластным слоем. В качестве грунтов естественного основания во всех случаях выступали суглинистые сильнольдистые грунты, аналогичные вскрытым закопашками в основании насыпи железной дороги в ходе маршрутных наблюдений. Основные физиче-

Таблица 2. Основные физические и теплофизические характеристики грунтов, по: [Строительные нормы..., 1990; Хрусталев, 1999]

Грунт	$P$ , кг/м <sup>3</sup>	$I$ , д.е.	$\Lambda_{th}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\Lambda_f$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$C_{th}$ , Дж/(кг·К)	$C_f$ , Дж/(кг·К)	$Z_v$ , Дж/кг
Балласт (насыпь)	1900	0.05	1.45	1.51	$2.36 \cdot 10^6$	$2.19 \cdot 10^6$	$3.18 \cdot 10^7$
Гравийно-щебеночная смесь (насыпь)	2060	0.03	2.09	2.15	$2.62 \cdot 10^6$	$2.43 \cdot 10^6$	$2.07 \cdot 10^7$
Песок (насыпь)	1800	0.20	2.68	2.85	$3.16 \cdot 10^6$	$2.41 \cdot 10^6$	$1.21 \cdot 10^8$
Супесь (насыпь)	1800	0.20	1.86	1.98	$3.16 \cdot 10^6$	$2.41 \cdot 10^6$	$1.01 \cdot 10^8$
Суглинок (естественное основание)	1200	0.40	1.57	1.80	$3.10 \cdot 10^6$	$2.11 \cdot 10^6$	$1.08 \cdot 10^8$

Примечание.  $P$  – плотность грунта;  $I$  – льдистость грунта;  $\Lambda_{th}$ ,  $\Lambda_f$  – теплопроводность грунта в талом/мерзлом состоянии;  $C_{th}/C_f$  – теплоемкость грунта в талом/мерзлом состоянии;  $Z_v$  – теплота таяния (замерзания) грунта.

ские и теплофизические характеристики грунтов, использованные при моделировании, представлены в табл. 2. Начальная температура естественных грунтов составляла по всей глубине  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура насыпных грунтов сверху вниз изменялась от  $-4$  до  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  с равномерным шагом, значение которого зависело от высоты насыпи.

Моделирование температурного поля проводилось на период 50 лет, что соответствует сроку эксплуатации железной и автомобильной дорог от их реконструкции в 1960-х гг. до настоящего времени.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное маршрутное обследование показало, что деформации полотна автомобильных и железных дорог в том или ином виде характерны для половины их протяженности. Деформации имеют различные формы и масштабы проявлений и представлены преимущественно осадками земляного полотна, трещинами асфальтового покрытия и обочин автомобильных дорог, изгибом рельс на железных дорогах, эрозией и оседанием откосов насыпей. Примерно на каждые 3 км пути приходится один участок с нарушениями устойчивости, угрожающими безопасности движения.

В ходе маршрутного обследования отмечено, что участки деформаций очень часто приурочены к перепадам рельефа местности, участкам подтопления насыпи термокарстовыми озерами и подпруженными ложбинами стока, а эрозия откосов земляного полотна на автомобильных дорогах часто ассоциирована с поперечными трещинами земляного полотна.

Значительную роль в развитие деформаций дорог вносит явно недостаточное количество во-

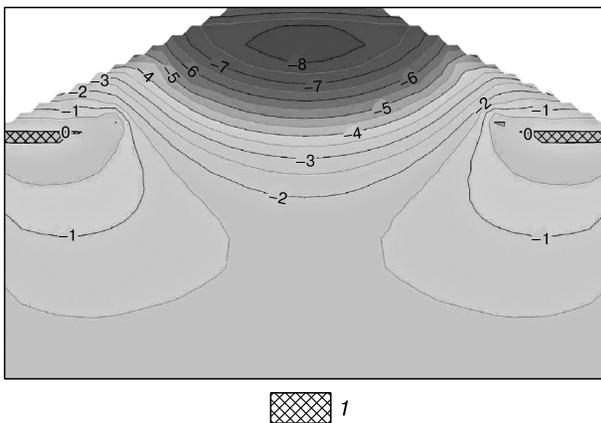
допропускных труб в насыпи (в среднем менее одной на 1 км трассы железной и автомобильной дорог) по сравнению с количеством участков подтопления насыпи временными водотоками и ложбинами стока. Более 3/4 водопропускных труб на железной и автомобильной дорогах имеют дефекты (нарушения уклонов, отсутствие стока воды, смещения бетонных звеньев, фильтрация по контуру трубы), что препятствует их нормальному функционированию.

Сравнение результатов проведенного маршрутного обследования автомобильной дороги с материалами (данными) обследования асфальтового покрытия, выполненного в 2007 г., показало, что, несмотря на ремонт, проведенный в 2008 г., количество и площадь участков деформаций покрытия выросли. Крупные по площади деформации асфальтового покрытия, как правило, были зафиксированы в 2010 и 2011 гг. на тех же участках, что и в 2007 г. Для более мелких деформаций (площадью до  $5\text{ м}^2$ ) такая унаследованность не наблюдается. Этот факт свидетельствует о том, что причиной значительных по площади деформаций асфальтового покрытия являются не производственные дефекты при ремонтах, а направленное изменение геотехнической ситуации в основании автомобильной дороги на конкретных участках.

Выполненное моделирование теплового состояния земляного полотна и естественных грунтов в его основании показало, что в основании насыпи высотой 6 м, сложенной гравийно-щебенистой смесью, к 50-му году эксплуатации не происходит значительного оттаивания многолетнемерзлых пород. Небольшие по размеру таликовые зоны формируются лишь у подножия откосов насыпи (рис. 1).

Для насыпей, сложенных более влажными грунтами (песками и супесями), объем, занятый в теле насыпи постоянно талыми грунтами, значительно увеличивается. При этом таликовые зоны располагаются исключительно под откосами насыпей. Грунты естественного основания насыпи из влажных песчаных и супесчаных грунтов оттаивают на глубину 1–2 м в основании откосов насыпи.

При высоте насыпей 2 м моделирование показало полное промерзание насыпных и естественных грунтов зимой и полное оттаивание насыпи и частичное оттаивание верхних горизонтов естественных грунтов (до глубины 1 м) в теплый период года. Для насыпей высотой 10 м отмечено оттаивание грунтов естественного основания на глубину до 4 м при использовании влажных грунтов (песков и супесей) для ее строительства. В основании насыпи из гравийно-галечниковых грунтов многолетнего оттаивания не происходит из-за меньшего отепляющего влияния снега.



**Рис. 1. Распределение температуры в основании насыпи высотой 6 м в конце периода охлаждения 50-го года эксплуатации.**

Цифрами показана температура грунтов в  $^{\circ}\text{C}$ ; 1 – грунты с температурой выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Синтез результатов маршрутного обследования и теплофизического моделирования позволил типизировать деформации изучаемых линейных сооружений по их морфологии и набору опасных экзогенных процессов и предложить наиболее, на взгляд авторов, вероятные причины их возникновения и рациональные решения для инженерной защиты участков, подверженных деформациям различных типов. Ниже приведены основные выделенные типы деформаций земляного полотна, развитые на автомобильных и железных дорогах Норильского промышленного района.

#### 1. Продольные просадки высоких насыпей.

Визуально этот тип деформаций имеет определенное сходство с закономерными изменениями продольных уклонов земляного полотна в соответствии с неровностями естественного рельефа, однако отличается неравномерностью изменения уклонов в поперечном и продольном сечении, их большими значениями и резкими “переломами” продольного профиля. Особенно заметны деформации дорожного полотна на участках, где насыпь пересекает границы различных элементов рельефа (рис. 2). В зонах развития продольных просадок высоких насыпей наблюдаются многочисленные последствия вынужденных ремонтов: подсыпки балласта, замены шпал и рельсов на железной дороге, устройство “заплаток”, в том числе в пределах поперечных трещин асфальтового покрытия на автомобильной дороге. Формирование данного типа деформаций связано с особенностями взаимодействия высоких насыпей с мерзлыми грунтами оснований, в частности, с изменением положения кровли вечномерзлых пород при пересечении дорогой термокарстовых котловин и термоплатформенных (останцовых) поверхностей.

Известно [Лисицына и др., 1989], что чем большее поперечное сечение (высоту) имеет насыпь, тем (при прочих равных условиях) больше повышение температуры в ее основании, что оказывает заметное влияние на прочностные характеристики мерзлых грунтов [Строительные нормы..., 1990], а также на глубину их сезонного оттаивания. Проведенное моделирование подтвердило данную закономерность и для исследуемой территории: на глубине 4.5 м от подошвы насыпи из гравийно-галечниковых грунтов температура мерзлых грунтов в конце теплого периода на 50-й год эксплуатации составила для насыпей высотой 2 м от  $-1.6$  до  $-2.4$  °С, для насыпей высотой 6 м – от  $-1.2$  до  $-1.9$  °С, для насыпей высотой 10 м – от  $-0.8$  до  $-1.5$  °С. Температура грунтов в поперечном разрезе в каждом случае закономерно уменьшалась по направлению от подошвы откоса до осевой части дороги (основной площадки). С точки зрения несущей способности мерзлых грунтов такое повышение температуры под высокими насыпями эквивалентно потере несущей

способности в сотни килопаскалей [Строительные нормы..., 1990]. В то же время при увеличении высоты насыпи возрастает нагрузка на естественные грунты в ее основании, усиливая реологические процессы [Вялов, 1978]. Своеобразные “ножницы”, возникающие между повышением механической нагрузки на грунты в основании сооружения и снижением их несущей способности, являются главной причиной возникновения продольных просадок высоких насыпей. Накопление снега у подножия насыпи в пределах термокарстовых котловин зимой и воды летом будет способствовать развитию процессов термокарста и обводнения оттаивающих грунтов.

Деформации такого типа наиболее распространены в пределах изучаемых объектов. Величина продольных просадок составляет обычно от нескольких десятков сантиметров до первых метров на участках протяженностью от 25–50 м до первых сотен.

Продольные просадки высоких насыпей сравнительно малоопасны, поскольку не формируют резких провалов, которые могут сказаться на безопасности движения. Однако такие деформации вызывают повышенный износ рельс на железной дороге и разрушение асфальтового покрытия автодороги, снижение эксплуатационных скоростей и повышение расхода топлива.

Отепляющее влияние насыпи, а также снега и воды, скапливающихся в котловинах, эффективнее всего компенсировать применением СОУ, поскольку изменение условий теплообмена через поверхность, направленное на повышение отрицательных теплооборотов, либо слишком трудоемко (расчистка снега на примыкающих участках и исключение его накопления в котловинах), либо сложно осуществимо (дренаж территории). Такие установки в данном регионе успешно применены для обеспечения устойчивости объектов гражданского назначения и ряда гидротехнических соору-



Рис. 2. Продольная просадка высокой насыпи на железной дороге у разезда “Валёк”.

Длина около 120 м, август 2010 г.

жений, в том числе плотины на оз. Долгое, по которой также проходят автомобильная и железная дороги, деформации на которых незначительны.

**2. Локальные просадки основной площадки насыпи** имеют размеры до нескольких метров в длину и распространяются на всю ширину основной площадки при глубине просадок до 10–20 см. Образование локальных просадок основной площадки насыпи (рис. 3) связано преимущественно с пересечением насыпью постоянных или временных водотоков, а также ложбин стока. В условиях нехватки или неправильного функционирования водопропускных сооружений в теле насыпи водотоки могут формировать локальные зоны подтопления у откосов насыпи, а вода – дренироваться через тело насыпи или оттаявшие грунты основания. Постоянное функционирование таких локальных зон подтопления и дренажа на участке пересечения насыпи с тальвегом вызывает оттаивание и понижение поверхности грунтов оснований и площадки насыпи. Как уже указывалось выше, критическая глубина водоемов для изучаемой территории составляет около 75 см. В ходе маршрутных исследований установлено, что на участках локальных просадок основной площадки насыпи глубина озер превышает указанную величину, и, следовательно, создаются предпосылки для многолетнего оттаивания грунтов основания.

В ходе обследования автомобильной дороги Норильск–Талнах отмечено развитие локальных просадок сложной конфигурации, которая, вероятно, повторяет форму каналов под насыпью, где идет дренирование. С точки зрения безопасности движения такие участки локальных просадок более опасны, чем продольные просадки высоких насыпей, поскольку они вызывают резкие перепады



**Рис. 3. Формирование локальной просадки основной площадки насыпи на участке неисправной водопропускной трубы.**

Автомобильная дорога Норильск–Талнах 16-й километр трассы, сентябрь 2010 г.

продольного профиля дорожного полотна на коротких отрезках, а также интенсивно деформируют само полотно. Проявления локальных просадок более характерны для насыпей высотой до 10 м.

Для предотвращения развития локальных просадок основной площадки насыпи при реконструкции участка дороги следует устраивать в основании полотна дополнительные водопропускные сооружения. Эффективным способом является дренаж примыкающей территории.

### **3. Деформации полотна низких насыпей.**

Этот тип деформаций характерен для железнодорожного пути на участках низких насыпей. Участок низкой насыпи железной дороги (высотой от 0.7 до 3.0 м), исследованный между ст. Голиково и разъездом Валёк, имеет высокую интенсивность как продольных, так и поперечных деформаций железнодорожного полотна при относительно небольших смещениях. Маленькая высота и сравнительно небольшая площадь подошвы насыпи приводят к большей зависимости показателей устойчивости верхнего горизонта естественных грунтов в ее основании от динамической нагрузки при движении поездов, чем на участках более высоких насыпей. Динамическая нагрузка от движения транспорта наиболее интенсивно проявляется до глубины первых метров, что связано с близким к экспоненциальному характером снижения ее величины за счет рассеивания в теле насыпи [Шахуняни, 1987]. Динамические нагрузки сравнительно большой величины, передающиеся грунтам в основании земляного полотна, в зимний период приводят к упругим деформациям мерзлых грунтов, что существенно сказывается на их работе [Цытович, 1973], а в летний период, при оттаивании сезоннотальных грунтов под насыпью – к разжижению и проявлению тиксотропных свойств.

В ходе моделирования теплового поля в основании земляного полотна низкой насыпи выявлена следующая особенность: несмотря на сильное охлаждение грунтов в зимний период, к концу теплого периода наблюдается оттаивание не только грунтов насыпи, но и приповерхностных горизонтов мерзлых грунтов на глубину до 1 м. Воздействие динамических нагрузок на этот сильноувлажненный оттаявший горизонт небольшой мощности, как и волновой характер их распространения, обуславливает малую амплитуду и высокую интенсивность деформаций.

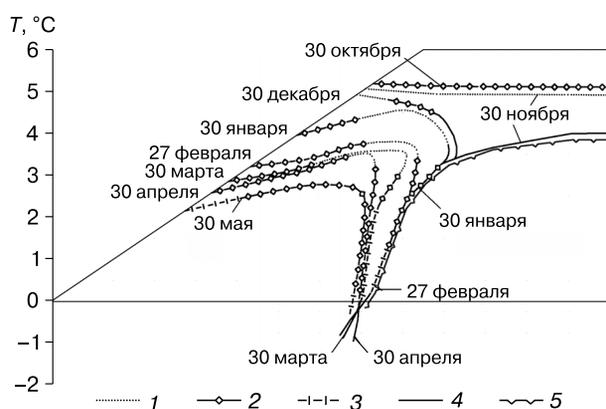
При наличии деформаций такого типа скорости движения транспорта вынужденно ограничиваются, зачастую до очень низких значений (10 км/ч на рассматриваемом участке). Рельсошпальная решетка в результате испытываемых напряжений очень быстро выходит из строя и требует замены.

Для предотвращения деформаций на таких участках необходимо армирование грунтов насыпи и естественного основания, как сезоннооттаивающих, так и вечномёрзлых. Это позволит повысить их прочность и более равномерно распределить нагрузку на грунты в основании дорог. Возможна также установка СОУ для понижения температуры грунтов и, как следствие, повышения их прочностных свойств.

**4. Деформации откосов насыпей** на исследованных участках автомобильной и железной дорог имеют разнообразный характер: эрозия откосов, трещины у бровки основной площадки, отседание откосов и основной площадки. Главной причиной их возникновения является снижение несущей способности естественных и насыпных грунтов в основании откоса, что ведет к просадкам, увеличению крутизны откоса и снижению прочности смерзания грунтов в теле насыпи. Выполненное моделирование температурного поля показывает, что практически для всех исследованных случаев (за исключением низких насыпей) в основании откоса наблюдается формирование талика (см. рис. 1). В случае эксплуатации насыпи из увлажненных грунтов талик образуется не только в естественных, но и в насыпных грунтах, что при весеннем снеготаянии делает их более уязвимыми к процессу эрозии. При оседании в процессе оттаивания естественных грунтов в основании земляного полотна напряжения в насыпном массиве будут провоцировать формирование трещин у бровки основной площадки. Также способствовать развитию трещин на стыке откоса и основной площадки будут характерные для данного многоснежного района условия сезонного промерза-

ния насыпей. Основной особенностью сезонного промерзания насыпей в данном случае является направление фронта промерзания преимущественно от основной площадки, притом, что откосы, перекрытые мощным снежным покровом, промерзают очень медленно. Это вызывает формирование значительных (до 20–25 °С/м) градиентов температуры в начальный период промерзания. При таких градиентах температуры в грунтах насыпи возможно образование морозобойных трещин. Направленность фронта промерзания от основной площадки при промерзании насыпных грунтов с большим количеством пылеватой фракции в условиях небольших (от 0.3 до 5.0 °С/м) температурных градиентов на глубине более 3 м в конце сезона охлаждения (рис. 4) может привести к развитию субвертикальных сегрегационных ледяных прослоев. При протаивании таких прослоев будут формироваться вертикальные зоны разуплотнения, по которым могут происходить сплыв и осадка грунтов.

Еще к одному типу деформаций, связанных с подтоплением насыпи и развитием термокарста, относится ступенчатое или блокообразное отседание откосов и основной площадки насыпи. Образование деформаций такого типа связано с неравномерностью несущей способности оттаивающих под воздействием термокарста грунтов оснований по направлению от подошвы откоса к оси земляного полотна (рис. 5). Зачастую “ступени” могут занимать значительную часть основной площадки. Разница в уровнях между “ступенями” может достигать 5–10 см. Напряжения в насыпных грунтах, вызываемые неравномерными осадками основания, приводят к формированию трещин и блоковому смещению насыпных грунтов, а также к разрушению асфальтового покрытия на автомобильных дорогах.



**Рис. 4.** Величина градиентов температуры грунтов у фронта промерзания по результатам моделирования температурного поля:

1 –  $>5\text{ }^\circ\text{C/м}$ ; 2 –  $1\text{--}5\text{ }^\circ\text{C/м}$ ; 3 –  $0.3\text{--}1.0\text{ }^\circ\text{C/м}$ ; 4 –  $<0.3\text{ }^\circ\text{C/м}$ . Линиями отображено положение фронта промерзания в теле насыпи на конец каждого месяца сезона охлаждения; 5 – кровля многолетнемерзлых пород.



**Рис. 5.** Ступенчатое отседание откосов и основной площадки насыпи автомобильной дороги Норильск–Талнах 10-й километр трассы, сентябрь 2010 г.

Борьба с такими деформациями обязательно должна включать мероприятия по выполаживанию и укреплению откосов, в том числе при помощи отсыпки берм. На исследованных объектах имеется положительный опыт применения берм, специально отсыпанных для предотвращения развития подтопления и подмыва насыпей.

Выбор эффективных методов борьбы со ступенчатым отседанием основной площадки затрудняется тем, что деформации такого типа очень часто развиваются в бортах замкнутых котловин, которые аккумулируют снег зимой и воду летом. Устройство подпорных стенок в данном случае проблематично, поскольку сложно обеспечить требуемую несущую способность фундаментов на участках активизации термокарста. Естественный водоотвод из таких понижений затруднен (или перегорожен “телом” насыпи) и поэтому наиболее оптимальным методом борьбы с отседанием основной площадки представляется армирование откосов и установка СОУ с целью повышения прочности грунтов в основании сооружения.

### ВЫВОДЫ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1) основной причиной развития деформаций автомобильной и железной дорог на участке Норильск–Талнах является развитие процессов подтопления и термокарста. Активизации этих процессов способствуют как природные условия региона (развитие сильнольдистых пород, плохой дренаж территории и др.), так и конструктивные недостатки линейных сооружений, в частности нехватка и неудовлетворительная работа существующих водопропускных сооружений;

2) несмотря на то что эксплуатация дорог продолжается уже несколько десятилетий, развитие деформаций не носит затухающего характера. Количество поврежденных участков автомобильной дороги Норильск–Талнах не уменьшается, а масштаб деформаций увеличивается;

3) выделены четыре основных типа деформаций земляного полотна, характерных для данных участков автомобильной и железной дорог. Все выделенные типы деформаций связаны со снижением несущей способности мерзлых грунтов в основании дорог, но различаются сочетанием неблагоприятных факторов, вызывающих повреждение дорожного полотна. На основании выделения ведущего для развития деформаций фактора предложены методы стабилизации геотехнической ситуации;

4) наиболее эффективные методы обеспечения стабильности авто- и железных дорог – укрепление оснований с помощью искусственного замораживания или армирования, организация и ре-

конструкция водопропускных систем, включая отвод воды в сезонноталом слое.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-335.2014.5).

### Литература

**Вялов С.С.** Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. М., Высш. шк., 1978, 447 с.

**Гребенец В.И., Керимов А.Г., Анишин В.М.** Обеспечение надежности транспортных систем в изменяющихся геоэкологических и геокриологических условиях // Вестн. Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности, 1999, № 8 (20), с. 13–16.

**Гребенец В.И., Ухова Ю.А.** Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований // Основания, фундаменты, механика грунтов, 2008, № 5, с. 24–29.

**Демидок Л.М.** Распространение, мощность и температурный режим мерзлых и талых пород // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М., Недра, 1989а, с. 173–176.

**Демидок Л.М.** Состав и криогенное строение пород // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М., Недра, 1989б, с. 176–180.

**Демидок Л.М., Лебедева Н.И.** Норильско-Туруханский район // Инженерная геология СССР: в 8-ми томах. Т. 3. Восточная Сибирь. М., Изд-во Моск. ун-та, 1977, с. 138–150.

**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.

**Кондратьев В.Г.** Геокриологические проблемы содержания федеральной автодороги “Амур” Чита–Хабаровск // Материалы Шестой Общерос. конф. изыскательских организаций “Инженерные изыскания в строительстве”. М., ООО “Геомаркетинг”, 2011, с. 101–104.

**Кондратьев В.Г.** Криогенные риски и ресурсы железных дорог в криолитозоне // Материалы Десятой Междунар. конф. по мерзлотоведению (ТГСОР) “Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире”. Т. 3: Статьи на рус. яз. / Под ред. В.П. Мельникова. Тюмень, Печатник, 2012, с. 235–240.

**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.

**Методика мерзлотной съемки** / В.А. Кудрявцев, Л.С. Гарагуля, К.А. Кондратьева, Н.Н. Романовский, Л.Н. Максимова, А.Б. Чижов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1979, 358 с.

**Минкин М.А., Чижов А.Б.** Анализ опыта освоения Южной Якутии // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М., Недра, 1989, с. 356–361.

**Оспенников Е.Н.** Техногенные геокриологические процессы на трассах железных дорог (на примере БАМ) // Геокриологические опасности: Темат. том / Под ред. Л.С. Гарагуля, Э.Д. Ершова. М., Изд. фирма “КРУК”, 2000, с. 163–171.

**Панченко Е.Г.** Взаимодействие железных дорог и экзогенных процессов в криолитозоне на примере трассы Обская–Бованенково на полуострове Ямал // Пром. и гражд. стр-во, 2009, № 11, с. 21–23.

**Перетрухин Н.А., Потатуева Т.В.** Оценка изменения геокриологических условий при линейном строительстве в Ангаро-Ленском регионе // Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М., Недра, 1989, с. 377–381.

- Полярная** магистраль / Под ред. Т.Л. Пашковой. М., Вече, 2007, 448 с.
- Программа** расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM / Н.В. Емельянов, Г.П. Пустовойт, Л.Н. Хрусталева, С.В. Яковлев // Свидетельство № 940281; Оpubл. РосАПО, 1994.
- Розенберг Л.И.** Прогноз изменений геокриологических условий при техногенном нарушении природной среды и опыт освоения горных стран // Геокриология СССР. Горные страны юга СССР. М., Недра, 1989, с. 345–353.
- Справочник** по строительству на вечномерзлых грунтах / Под ред. Ю.Я. Велли, В.И. Докучаева, Н.В. Федорова. Л., Стройиздат, 1977, 552 с.
- Строительные** нормы и правила: СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., ЦИПТ Госстроя СССР, 1990, 56 с.
- Хрусталева Л.Н.** Расчет земляного полотна // Основы геокриологии. Ч. 5: Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, с. 345–354.
- Цветкова М.Г.** Деструктивные термоденудационные процессы, выявленные при мониторинговых наблюдениях насыпи строящейся железнодорожной линии “Обская–Бованенково” (полуостров Ямал) // Материалы Третьей Общественной конф. изыск. организаций “Инженерные изыскания в строительстве”. М., ОАО “ПНИИИС”, 2008, с. 174–175.
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. М., Высш. шк., 1973, 444 с.
- Шахунянец Г.М.** Железнодорожный путь / Г.М. Шахунянец. М., Транспорт, 1987, 479 с.
- Шевелева Н.С.** Геокриологические условия Енисейского севера / Н.С. Шевелева, Л.С. Хомичевская. М., Наука, 1967, 126 с.
- Шестернев Д.М., Чащина М.К.** Опыт освоения территории при линейном строительстве // Геокриология СССР. Горные страны юга СССР. М., Недра, 1989, с. 151–154.
- Grebenets V.I., Kerimov A.G., Sklarov N.D., Anichin V.M.** Maintenance of reliability of support of transport outcomes in a cryolithic zone // Proc. of the XII European Conf. on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, The Netherlands, Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1999, vol. 1, p. 318–324.

*Поступила в редакцию  
2 апреля 2015 г.*