КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 4, с. 43–57 **http://www.izdatgeo.ru**

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 625.12 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(43-57)

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ И ИХ УСТРАНЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

П.И. Дыдышко

Акционерное общество "Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта", 129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, 10, Россия; otdputi@mail.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований деформаций земляного полотна в районах вечной мерзлоты и способов его стабилизации. Деформации происходят вследствие изменения условий теплообмена. Насыпь воздействует на вечномерзлые грунты как "горячий" штамп. Верхняя граница вечной мерзлоты под насыпью опускается. Ледяные включения в вечномерзлом грунте вытаивают. Затем в течение десятилетий проявляется длительная просадочность из-за выдавливания талых глинистых грунтов основания. Осадки и расползания насыпи приурочены преимущественно к моховым, травянисто-кочковатым слабосточным основаниям. Экспериментально установлено слабое состояние грунтов под насыпью, которое является предпосылкой и причиной реологических процессов (пластического течения грунта) и неравномерных осадок насыпи. Влага в оттаивающий слой грунта мигрирует под действием открытого термоэлектрокинетического явления в капиллярных анизотермических системах. Для устранения деформаций необходимо поднять мерзлоту в откосных зонах насыпи или создать механическую преграду выдавливанию грунта. Разработан и экспериментально испытан ряд новых технических решений, направленных на устранение указанной причины деформации.

Земляное полотно железнодорожного пути, вечная мерзлота, осадки и расползания, замораживание грунта, удерживающие конструкции

DEFORMATION OF RAILWAY SUBGRADE UPON PERMAFROST AND STABILIZATION MEASURES

P.I. Dydyshko

Stock Company "Railway Transport Research Institute", 10, 3rd Mityschinskaya str., Moscow, 129626, Russia; otdputi@mail.ru

The paper presents results of experimental studies of subgrade deformation in permafrost areas and measures for its stabilization. Deformation results from heat transfer changes caused by railway construction and operation. An embankment loads the cryotic soil like a hot press which lowers the permafrost table to 6–10 m below the superstructure and causes melting of ground ice. The subsequent extrusion of thawed yielding muddy soil from beneath the subgrade leads to decades-long soil subsidence. As a result, the subgrade experiences settlement and lateral spreads, especially in poorly drained soils with a moss-grass-peat cover. As shown by experiments, native soil under the subgrade is mechanically weak and prone to rheological changes (plastic flow) that induce uneven subgrade settlement. Moisture migration in thawing soil is driven by thermo-electrokinetic forces in thermally anisotropic capillary systems. Possible subgrade stabilization measures include ground freezing under slopes and creating mechanical barriers to soil extrusion. A number of respective engineering solutions have been suggested and experimentally tested.

Railway subgrade, permafrost, subgrade settlement and lateral spreads, soil freezing, retaining structures

ВВЕДЕНИЕ

Суммарная протяженность участков железных дорог общей сети, расположенных в районах вечной мерзлоты, составляет свыше 5 тыс. км. Они находятся в эксплуатации от 30 до 100 лет. После устройства земляного полотна и укладки верхнего строения пути изменяются условия теплообмена. Независимо от толщины слоя минерального грунта, размещенного на поверхности, происходит понижение верхней границы вечной мерзлоты (рис. 1). Это является результатом повышения температуры поверхности в период оттаивания за счет отсутствия затенения и испарения влаги растительностью, а также быстрого оттаивания вследствие низкой влажности грунта

© П.И. Дыдышко, 2017

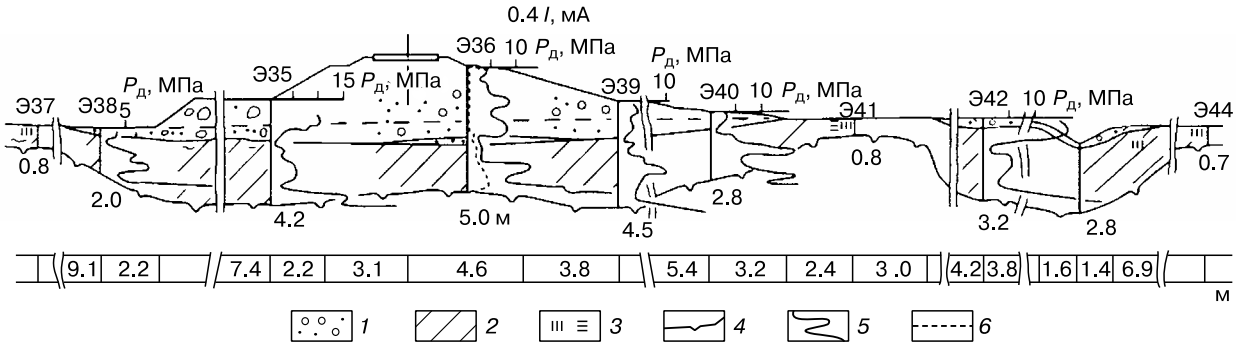


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез оседающей насыпи на мари.

1 – дренирующий грунт насыпи; *2* – глинистый грунт основания; *3* – торф; *4* – верхняя граница вечной мерзлоты; *5* – условное динамическое сопротивление ($P_д$, МПа); *6* – сила тока (*I*, мА), Дальневосточная железная дорога; Э35...Э44 – точки зондирования.

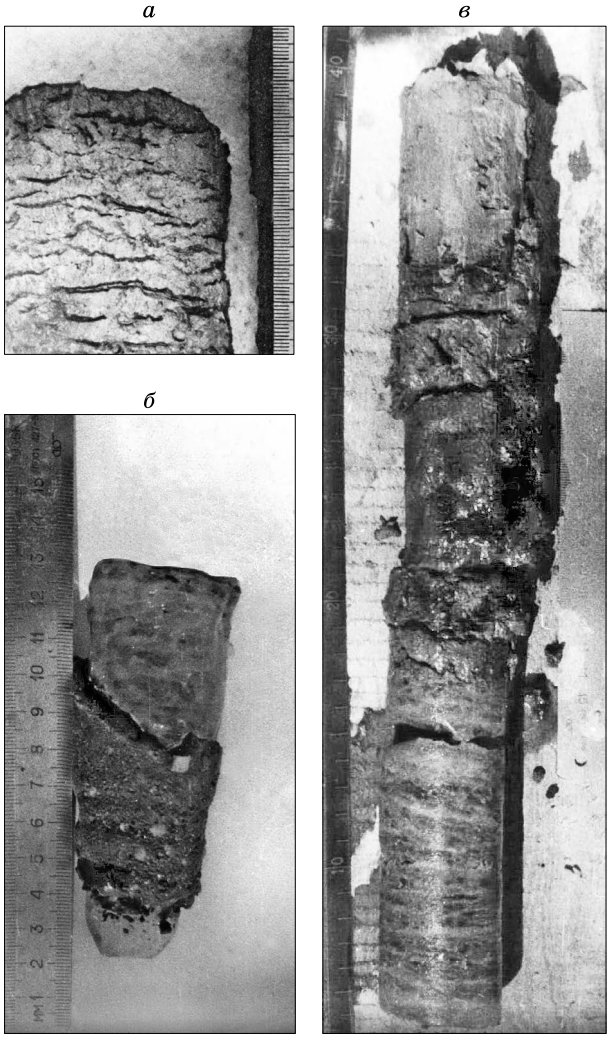


Рис. 2. Прослои сегрегационного льда в суглинке (*а*) и в суглинке с дресвой (*б*); пласт льда толщиной 3.2 м на контакте с заторфованным суглинком (*в*).

насыпи по сравнению с грунтами основания. Насыпи отсыпаны преимущественно несвязными (дренирующими) грунтами. Поверхность дренирующего грунта и обводненная поверхность нагреваются в несколько раз больше, чем в естественных условиях (соответственно от 4 до 16 °С и от 0.4 до 6 °С в дневном цикле) [*Дыдышко, 1991а*].

Земляное полотно воздействует на вечномерзлые грунты основания как “горячий” штамп. Верхняя граница вечной мерзлоты (ВГВМ) в пределах зоны с нарушенным температурным режимом, по данным автора, опускается, например, на Байкало-Амурской магистрали (БАМ) до 6–10 м от верха насыпи. Сезоннопромерзающий слой не смыкается с ВГВМ, в земляном полотне и его основании формируется талик. Под насыпью температура вечномерзлых грунтов повышается примерно до –1 °С.

Указанная мерзлотно-грунтовая ситуация характерна для южной части криолитозоны в восточных и северных районах страны. На отдельных участках (например, Ноябрьск–Коротчаево Свердловской железной дороги) в насыпи и основании мерзлые грунты не зафиксированы до глубины 15 м.

В естественных условиях на прилежащих к железным дорогам территориях температура грунта на глубине нулевых амплитуд составляет –1...–3 °С. Толщина сезонноталого слоя грунтов в зависимости от их вида и характера растительно-торфяного покрова изменяется от 0.6 до 1.5 м. Мощность криогенной толщи в рассматриваемых районах достигает 50–100 м [*Инженерная геология..., 1976; Геология..., 1988*].

При понижении ВГВМ вытаивают ледяные включения в грунте (рис. 2). Вследствие вытаивания льда реализуются осадки оттаивающих грунтов [*Роман, 2002*], характеризуемые как начальная просадочность. Затем в течение десятилетий (дли-

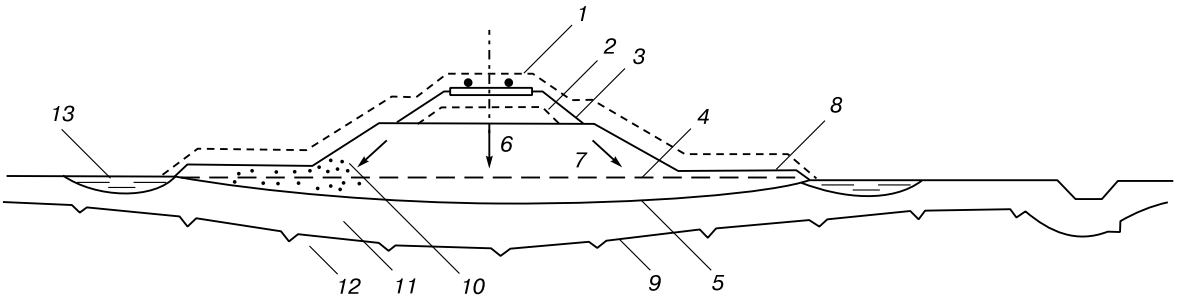


Рис. 3. Осадки и расползание насыпи на оттаивающих вечномерзлых грунтах:

1 – построечное положение земляного полотна и балластной призмы; *2* – то же, после осадки; *3* – то же, после исправления пути его подъемкой; *4* – подошва насыпи в построечном состоянии; *5* – то же, после осадки; *6* – направление перемещений центральной части насыпи; *7* – то же, боковых частей; *8* – бермы; *9* – верхняя граница вечной мерзлоты; *10* – дренирующий грунт насыпи; *11* – глинистые грунты основания в талом состоянии; *12* – то же, в мерзлом; *13* – понижения, заполненные водой.

тельная просадочность) за счет выдавливания талых глинистых грунтов основания, находящихся в текучем (текучепластичном) состоянии, происходят осадки и расползания насыпи (рис. 3).

Протяженность участков с осадками насыпей на железных дорогах составляет свыше 800 км. Из этой протяженности 75 % приходится на Дальневосточную железную дорогу, 13 % на Восточно-Сибирскую и 6 % на Северную, остальные 4 % и более 1 % – на Забайкальскую и Свердловскую соответственно. Средняя протяженность одного деформирующегося места составляет 400 м.

ХАРАКТЕР И ПРИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИЙ

Под насыпным, как правило, дренирующим грунтом экспериментально с использованием геофизического метода электроконтактного динамического зондирования (ЭДЗ) впервые установлен слой грунтов основания, находящихся в текучепластичном (текучем) состоянии [*Дыдышко, 1991а*]. Его толщина равна 0.1–0.3 м. Модуль деформации этих грунтов составляет менее 10 МПа, что характеризует их как слабые [*ЦПИ-36, 2004*]. Ниже находятся более прочные грунты. Такая ситуация характерна для всех видов глинистого грунта независимо от его начальной просадочности. Избыточному увлажнению оттаивающих грунтов способствует миграция пленочной воды в капиллярах под действием открытого термоэлектрокинетического явления – термоэлектрокинеза [*Дыдышко, 1991б, 1992; Thermoelectrokinesis.ru*]. Сущность этого явления заключается в том, что при наличии температурного градиента в пленочной воде (двойном электрическом слое) возникает разность электрических потенциалов и под ее воздействием эта вода перемещается (мигрирует) к более холодной стороне. На фронте (границе) сезонного оттаивания грунта значение температурного градиента достигает 4 °С/м.

Отдельные части (элементы) насыпи перемещаются вниз и в стороны от оси земляного полотна (рис. 4, *а*), в том числе с разрывом сплошности – образованием трещин шириной до 30 см и более (рис. 4, *б*). Неравномерные осадки насыпей достигают 100–300 мм в год. Примерно треть годовой осадки приходится на ноябрь–декабрь. Феномен обусловлен изменением направленности градиента температуры и потоков мигрирующей пленочной воды из талого переувлажненного слоя к фронту промерзания. За зимний период происходит морозное пучение до 30–50 мм.

При ненарушенной поверхности основания тепловое воздействие насыпи распространяется примерно на 2 м от ее края.

В местах с засыпанной минеральным грунтом поверхностью ВГВМ опускается (см. рис. 1, точка зондирования Э42). Аналогичная деградация мерзлоты происходит при обводнении поверхности. Устроенные бермы шириной 3 м с обеих сторон насыпи (до 20 % стоимости земляного полотна) и повторная нарезка водоотводных канав с предварительной засыпкой их дренирующим грунтом приводят к увеличению ширины зоны с нарушенным температурным режимом и к обводнению по всему ложу протаивания, изменяющему естественную гидрологическую и гидрогеологическую сеть.

Оттаиванию способствует также отсутствие водопропускных сооружений в местах естественных понижений рельефа (до 1/3 от общего количества водопропускных сооружений на восточном участке северного широтного хода Дальневосточной железной дороги), что приводит к застоям воды и ее фильтрации через насыпь.

При проектировании и строительстве в условиях вечной мерзлоты допущено устройство мостов и труб вне естественных водотоков с пересыпанием их насыпями и отводом русел.

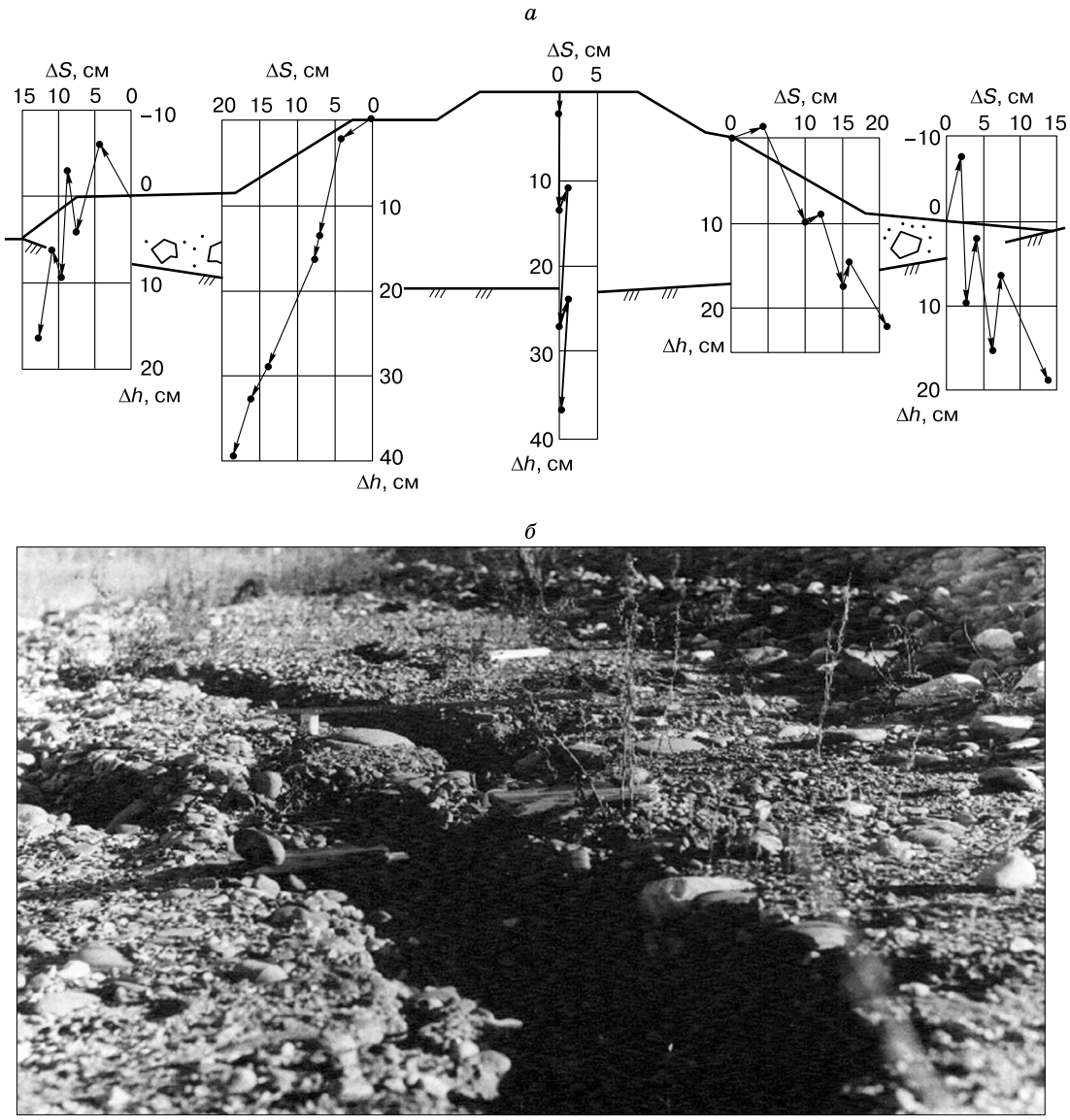


Рис. 4. Векторы перемещений поверхности различных частей насыпи в циклах осень–весна за три года (*а*) и трещины разрыва на обочине насыпи (*б*).

ΔS, Δh – перемещения в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

С учетом полученного негативного опыта нормами [*СТН Ц-01-95, 1995*] регламентировано проектирование водопропускных сооружений во всех естественных понижениях профиля (на слабосточных участках – через 500 м), пересыпание водотоков насыпями с отводом русел не допускается. На участках со сложными мерзлотно-грунтовыми условиями (относительная осадка более 0.1, термокарст, подземные льды до глубины 4 м от поверхности) следует сохранять грунты в вечномерзлом состоянии.

Наличие экспериментально установленного под подошвой насыпи и берм слоя грунта, обладающего низкой прочностью, – основная предпосылка (причина) проявления здесь реологических процессов (пластического течения грунта) и неравномерных осадок насыпи.

Осадки и расползания насыпей возникают главным образом на моховом, травянисто-кочковатом слабосточном основании. Насыпи, расположенные в местных понижениях, имеющих форму медальонов размером 200–500 м с угнетенными

деревьями (до 3 м) и окаймленных крупным смешанным лесом, особенно подвержены неравномерным интенсивным осадкам. Такие понижения характерны для всех рассматриваемых регионов вечной мерзлоты.

СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

С целью устранения деформаций в соответствии с установленной причиной их проявления требуется заморозить грунты в зоне подошвы откосов насыпи или создать механическую преграду выдавливанию грунта.

Для замораживания оттаивающих грунтов применялись длинномерные термосифоны (267, 489, 366, 330-й километры участка Ноябрьск–Коротчаево и др.), тепловая изоляция из пенопласта (211-й, 212-й километры участка Тында–Беркакит), торф и другие способы теплового регулирования. Технические решения разработаны по результатам математического и физического моделирования.

Для обеспечения стабильности земляного полотна на просадочных при оттаивании грунтах в районах вечной мерзлоты выполняют рекультивацию прилежащей к насыпи зоны и отвод воды, а также сооружают противодеформационные конструкции, устраняющие неравномерные осадки.

При рекультивации существующие термокарстовые понижения с застоями воды, термокарстовые озера и старицы, а также подмостовое пространство и подходы к водопропускным трубам, где не обеспечивается сток воды, заполняют торфом, заторфованным суглинком или древесными отходами (опилки, щепа, корье, сучья). Из пониженных мест отводят воду в продольном или поперечном к пути направлении. Для укрепления имеющихся канав по дну и откосам укладывают нетканый материал, который пришпиливают к ним и проливают суспензией местного грунта.

Дополнительно к существующим водоотводам целесообразно создавать систему дрен. Одну из дрен выполняют из полосы нетканого материала иглопробивного производства без термической обработки (масса 1 м^2 составляет 500 г) шириной 1–1.5 м, свернутой в рулон. Ее заглубляют на 0.2 м у подошвы откоса насыпи. Вторую дрену устраивают из перфорированных полимерных труб, погружаемых в нарезаемую механическим способом щель совместно с полосой нетканого материала на глубину от 1 до 3 м. Продольные дрены размещают между водопропускными сооружениями. В подмостном пространстве укладывают поперечные дрены, продолжая их на расстояние 100–200 м в низовую сторону.

На участках, где трудно осуществить продольный водоотвод из пониженных мест с нагорной стороны, проектируют фильтрующие прорези из отборного камня слабовыветривающихся пород. В полосе отвода сохраняют деревья и кустарник, а противопожарные полосы, очищенные от растительности, не устраивают.

Для устранения неравномерных интенсивных осадок и расползания насыпей, помимо указанных способов замораживания грунтов (тепловая изоляция и термосифоны) и широко применяемой каменной наброски на откосах, целесообразно предусматривать удерживающие конструкции из гофрированных элементов [*Способ..., 2009*], покрытие откоса полыми элементами [*Покрытие..., 1995*], а также замену грунтов основания у подошвы откосов насыпи (берм) на дренирующие грунты [*Технические указания, 1993*].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОТИВОДЕФОРМАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ*

Тепловая изоляция из пенопласта. По результатам теплотехнических расчетов в двумерной постановке толщину слоя тепловой изоляции из пенопласта на насыпях эксплуатируемых линий в районах южной части криолитозоны принимали не менее 20 см. Плиты укладывали вплотную друг к другу в несколько слоев с перекрытием швов на величину не менее 30 см. Ширина тепловой изоляции составляла 6 м с каждой стороны насыпи.

Данные расчетов и натурных наблюдений температурного режима грунтов насыпи и основания с тепловой изоляцией из пенопласта на вечной мерзлоте приведены на рис. 5, 6. По этим данным под средней частью слоев пенопласта с обеих сторон насыпи формируются мерзлые зоны.

На участках с тепловой изоляцией из пенопласта на 211–212-м километрах участка Тында–

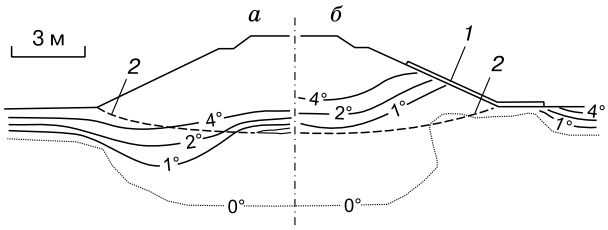


Рис. 5. Расчетные температурные поля (°С) в грунтах насыпи и основания в квазистационарном режиме на 1 октября (19.5 лет):

а – естественное состояние; *б* – с тепловой изоляцией из пенопласта; *1* – тепловая изоляция; *2* – раздел насыпи и основания.

* Указанные здесь и далее результаты экспериментальных исследований по всем техническим решениям получены автором.

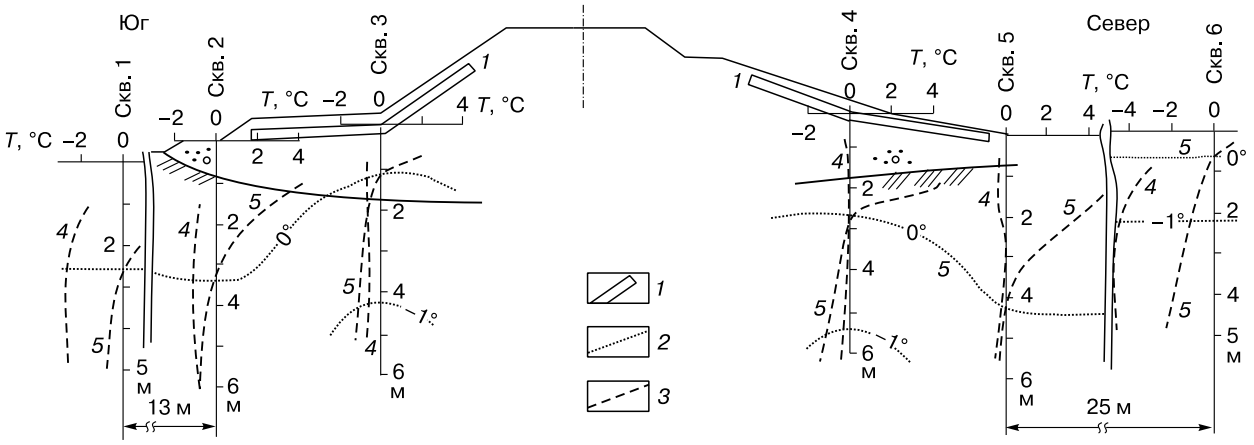


Рис. 6. Поле (*2*) и графики (*3*) распределения температуры в поперечном сечении насыпи и основания с тепловой изоляцией из пенопласта (*1*).

4, 5 – периоды максимального промерзания и оттаивания последнего года наблюдений соответственно.

Беркакит под средней частью слоя пенопласта глубина оттаивания через 4 года составляла 2.7 м, через 18 лет – 2.8 м. Температура грунта на глубине 6 м (глубина оттаивания без пенопласта) была равна соответственно –1.0 и –0.6 °С (данные получены совместно с Мерзлотной станцией Центра ИССО).

Тепловая изоляция из пенопласта совместно с длинномерными термосифонами. Для повышения эффективности тепловой изоляции под слоем пенопласта рекомендуется размещать длинномерные термосифоны. В зависимости от местных и мерзлотно-грунтовых условий наклонные части термосифонов (испарители) укладывают параллельно продольной оси пути под средней частью слоя пенопласта (схема 1) или перпендикулярно этой оси в поперечных траншеях, устраиваемых под этим слоем (схема 2). Конденсаторы термосифонов располагают вертикально.

Расчеты температурного режима деформирующегося откоса после установки термосифонов по схеме 2 автором выполнены для насыпи на косогоре 1374-го километра, разъезд Казанкан, вблизи станции Северомуйск на БАМе. Поперечное сечение земляного полотна приведено на рис. 7. В нижней части рисунка указаны высотные отметки (верхняя графа) и расстояния (нижняя графа) в метрах.

Термосифоны располагают в поперечных траншеях на глубине 0.6 м. Траншеи засыпают грунтом. На поверхности укладывают пенопласт, толщина слоя которого 0.15 м. Сверху отсыпают слой дренирующего грунта толщиной 0.2–0.3 м.

Датой начало расчета принято 1 октября – время окончания теплого периода года. Температура грунтов в теле насыпи и ее основания принята равной 0.5 и –0.5 °С. Температурные поля по сечению А (см. рис. 7) через 5 лет на 1 октября приведены на рис. 8, *а*, *б* соответственно.

При температуре насыпи 0.5 °С (талый грунт) уже через год формируется мерзлая зона. Толщина зоны составляет более 1 м и постепенно увеличивается: через 2 года превышает 2 м, через 5 лет – 6 м.

При температуре насыпи –0.5 °С происходит более глубокое охлаждение. В этом случае толщина пенопласта может быть уменьшена до 0.1 м.

Установленные на этом участке вертикальные охлаждающие установки (см. рис. 7, поз. *17*) не обеспечили его стабилизацию.

Тепловая изоляция из торфа и древесных отходов. Тепловую изоляцию из торфа или древесных отходов предусматривают в виде отсыпки на откосах насыпей и естественном основании в форме треугольника в поперечном сечении с вершиной у бровки насыпи и основанием не менее 3 м от подошвы откоса. На эту отсыпку укладывают геоматы, нетканый материал, пролитый суспензией местного грунта, или слой местного грунта толщиной 0.2 м.

Каменная наброска на откосах. Каменную наброску на откосах выполняют из отборного камня слабовыветривающихся пород при отсутствии метелевого переноса снега и его толщине на откосе не более 0.4 м. Толщина слоя этой наброски на откосе – от 0.8 до 1.2 м.

Условия проектирования и конструкции длинномерных термосифонов. Проектирование противодеформационных мероприятий с использованием длинномерных термосифонов выполняют в соответствии с требованиями [*ЦПИ-40, 2009*].

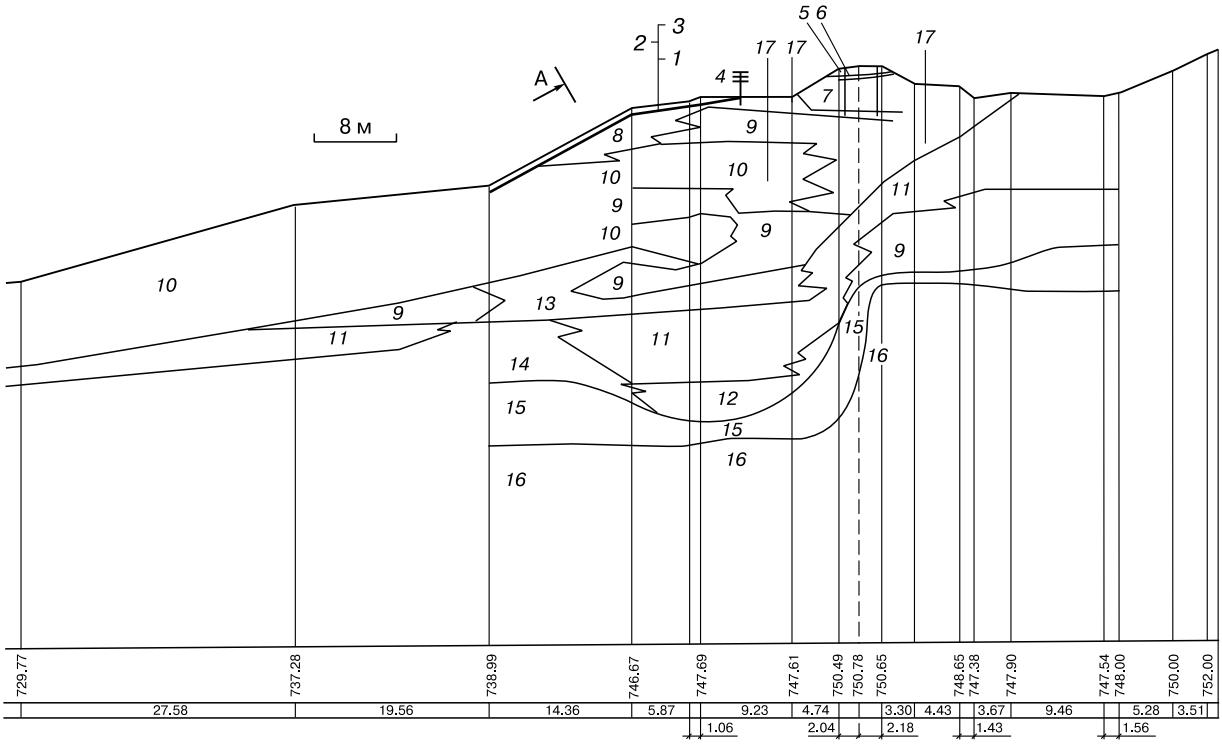


Рис. 7. Поперечное сечение земляного полотна на косогоре 1374-го километра БАМа с устройством длинномерных термосифонов (*1*) под тепловой изоляцией из пенопласта (*2*).

3 – слой дренирующего грунта; *4* – конденсатор; *5* – щебень; *6* – песок; *7* – глыбовый грунт; *8* – щебенистый грунт; *9* – супесь гравелистая; *10* – щебенистый грунт с супесчаным заполнителем; *11* – супесь текучая при оттаивании; *12* – супесь пластичная при оттаивании; *13* – супесь с галькой; *14* – галечниковый грунт; *15* – гранит выветрелый; *16* – гранит прочный; *17* – вертикальные охлаждающие установки.

Длинномерные термосифоны устанавливают на участках с осадками насыпей при следующих условиях:

– неравномерные (более 20 мм/год) осадки насыпей на оттаивающих вечномерзлых грунтах в пределах марей или болот на различных элементах рельефа;

– осадки в местах пересыпанных насыпями русел водотоков, термокарстовых озер;

– осадки в местах примыкания насыпей к устоям мостов.

Для длинномерных термосифонов используют стальные трубы диаметром 60 мм или трубы из алюминиевого сплава диаметром 32 мм. В качестве теплоносителя применяют фреон-22. Длинномерные термосифоны состоят из наклонной части (испарителя), располагаемой в грунте, и вертикальной оребренной части (конденсатора), размещаемой над поверхностью грунта.

Удерживающие конструкции выполняют из стальных труб диаметром 110 мм. Их устанавливают в продольных сечениях, проходящих через конденсаторы. Трубы погружают вертикально в грунт через 1.25 м на глубину не менее 5 м и объединяют поверху горизонтально уложенными такими же трубами.

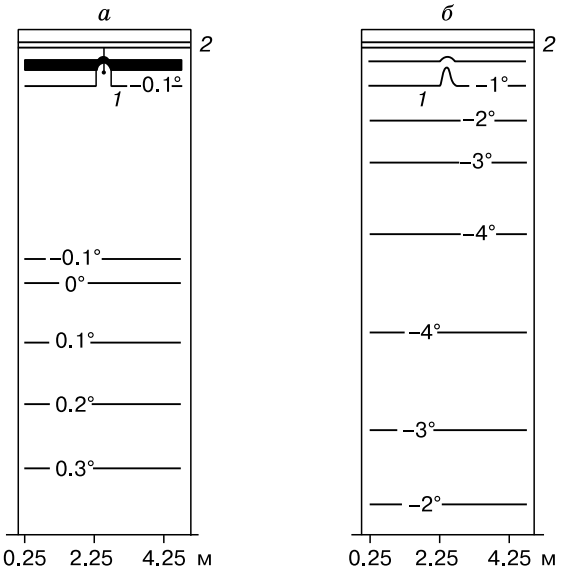


Рис. 8. Температурное поле в земляном полотне через 5 лет на момент окончания теплого периода года для начальной температуры 0.5 °С (*а*) и −0.5 °С (*б*).

1 – длинномерный термосифон; *2* – пенопласт; на изотермах – температура, °С.

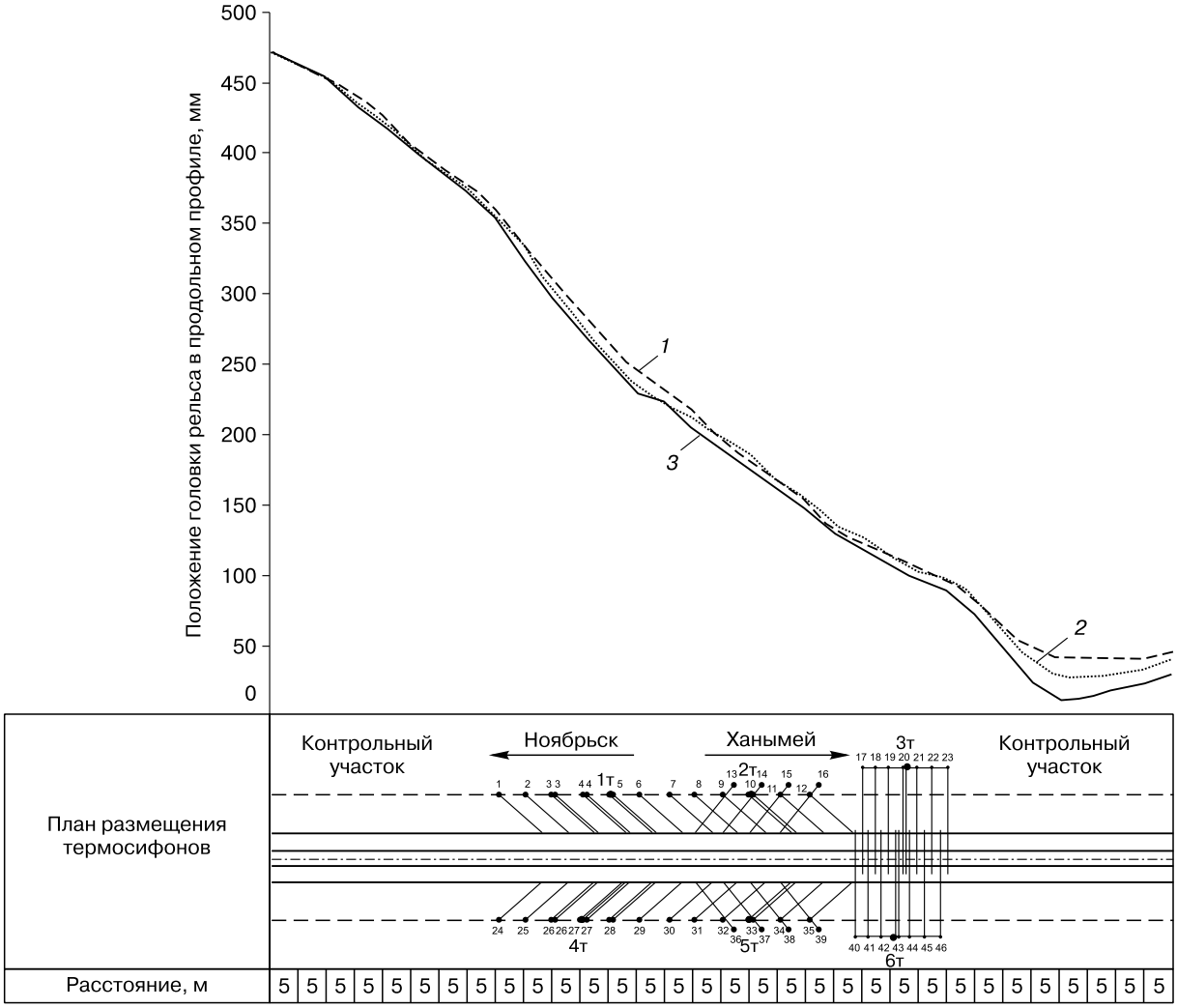


Рис. 9. План размещения термосифонов и продольный микропрофиль пути на 267-м километре:

1 – сентябрь 2005 г.; *2* – апрель 2006 г.; *3* – сентябрь 2006 г.; 1т–6т – термометрические скважины.

Конструкции устранения осадок насыпей на вечной мерзлоте устраивают по двум вариантам: 1) длинномерные термосифоны совместно с удерживающими конструкциями; 2) длинномерные термосифоны.

Длина наклонной части составляет 9 м, вертикальной – 2.3 м. Угол между наклонной частью трубы и горизонтом равен 11°. Наклонные части длинномерных термосифонов размещают под насыпью под углом к продольной оси пути таким образом, чтобы расстояние от оси пути до конденсатора было не менее 7 м, а расстояние от оси пути до конца наклонной части устройства (в проекции) – не менее 2.5 м. Размещение испарителей в основании под насыпью обеспечивает дополнительное термическое сопротивление грунта, необходимое для предупреждения оттаивания намороженной части в летнее время.

При самостоятельном использовании длинномерных термосифонов (вариант 2) применяют следующие схемы расположения наклонных частей: под углом к продольной оси пути; то же в противоположных направлениях; перпендикулярно оси пути в подшпальном основании; то же в пределах зоны обочин.

На 267-м километре линии Ноябрьск–Коротчаево Свердловской железной дороги в пределах деформирующегося с интенсивностью до 300 мм/год участка насыпи в 2005 г. по разработкам автора ВНИИЖТ и “Фундаментпроект” установили охлаждающие устройства – длинномерные термосифоны, по всем указанным выше вариантам и схемам (рис. 9). На плане рис. 9 показаны термосифоны 1–46 и термометрические скважины 1т–6т. Схемы выполненных конструкций с длинномерными термосифонами на других участках

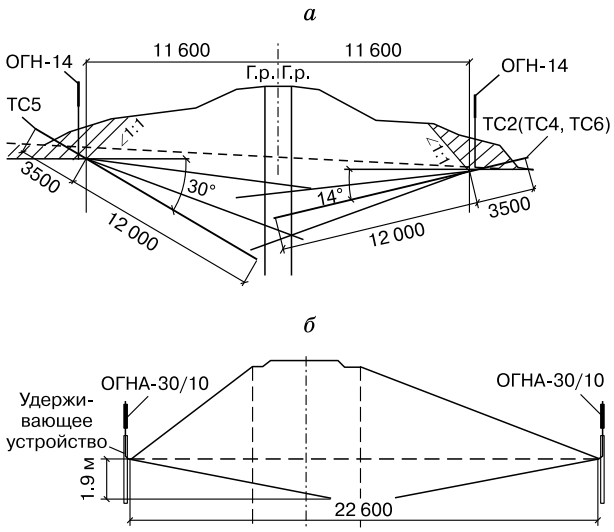


Рис. 10. Схема устройства длинномерных термосифонов на 489-м (*а*) и 366-м километрах (*б*).

Г.р. – головка рельсов.

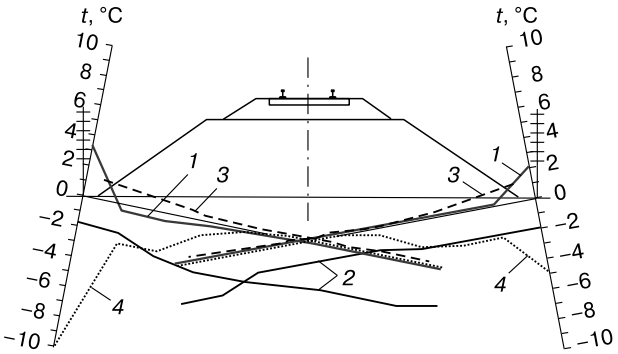


Рис. 11. Графики распределения температуры в термоскважинах 3т и 6т (см. рис. 9) по длине термосифона:

1 – сентябрь 2005 г.; *2* – апрель 2006 г.; *3* – сентябрь 2006 г.; *4* – октябрь 2006 г.

Свердловской железной дороги показаны на рис. 10. Осадки насыпей после установки термосифонов прекратились.

В местах пересыпанных насыпями русел водотоков, термокарстовых озер, а также в местах примыкания насыпей к устоям мостов длина наклонных частей термосифонов и угол их наклона к горизонту определяются в зависимости от местных условий. Расстояние между длинномерными термосифонами, их ориентация относительно продольной оси пути и количество рядов по высоте назначают индивидуально.

По данным термометрических наблюдений на 267-м километре температура грунтов земляного полотна в период максимального промерзания изменяется от –4 до –1.5 °С, в осенний период она ниже 0 °С (рис. 11, 12). Независимыми методами – ЭДЗ и измерением температуры грунта – в период максимального оттаивания автором в 2007 г. установлено положение ВГВМ в зоне обочины над термосифонами на глубине 3 м от поверхности. Расчетом в трехмерной постановке определено, что глубина расположения изотермы 0 °С для этих условий равна 2.7 м.

На 489-м километре осадки насыпи происходили в месте пересыпанного русла р. Тыдэотта. Мост был сооружен на удалении от реки и к нему подведено новое русло. В 2003 и 2007 гг. произошли термокарстовые провалы грунтов насыпи соответственно на расстоянии 1 м от рельсошпальной решетки (слева по ходу ж/д линии) и внутри нее.

Для устранения осадок и предупреждения провалов с обеих сторон насыпи установили длинномерные термосифоны с интервалом 2.25 м в два

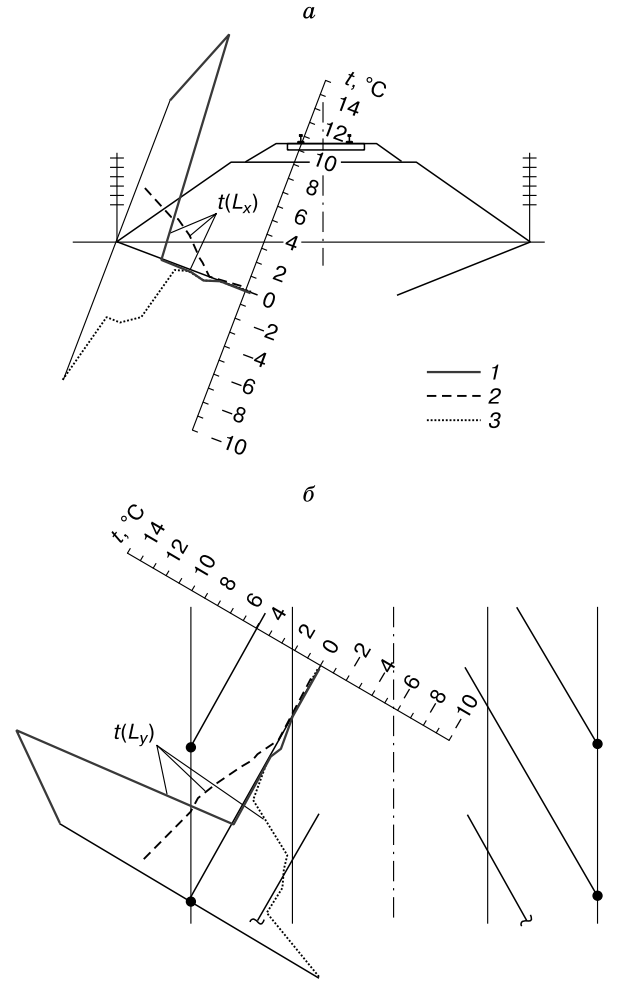


Рис. 12. Графики распределения температуры в термоскважине 1т по длине термосифона:

а – в поперечном разрезе ($t(L_x)$); *б* – в плане ($t(L_y)$); *1* – сентябрь 2005 г.; *2* – сентябрь 2006 г.; *3* – октябрь 2006 г.

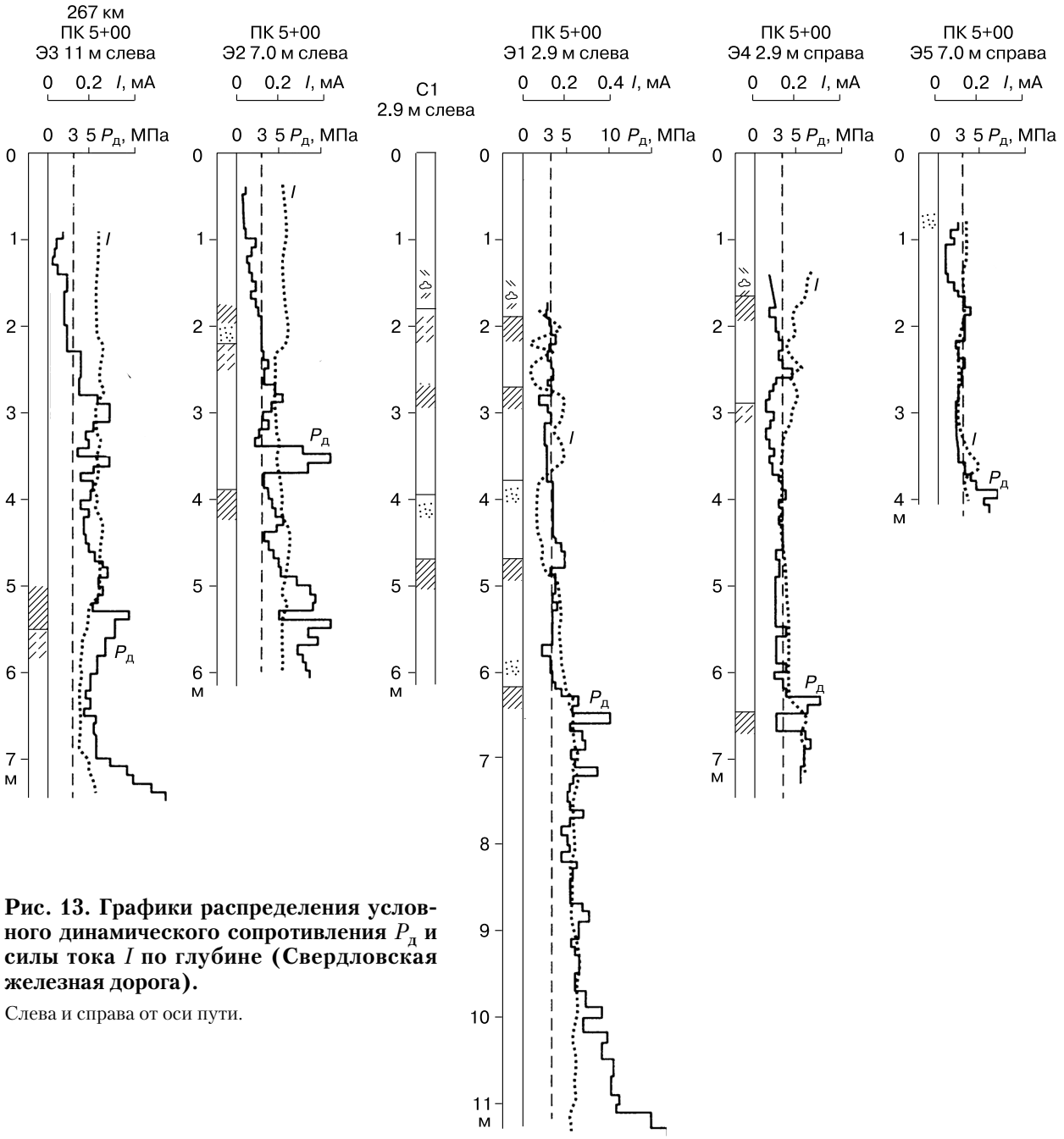


Рис. 13. Графики распределения условного динамического сопротивления $P_д$ и силы тока I по глубине (Свердловская железная дорога).

Слева и справа от оси пути.

ряда по высоте и длиной наклонной части 12 м (см. рис. 10, *а*). После проведенных стабилизационных мероприятий на 489-м километре осадки насыпи прекратились, провалы не проявляются. Максимальная выправка пути не превышает 10 мм. Температура грунта в термометрических скважинах в период оттаивания ниже 0 °С.

Параметры противодеформационных конструкций (протяженность, глубина расположения и др.) устанавливают по результатам инженерно-геологического обследования с использованием георадиолокации и ЭДЗ [*ЦПИ-36, 2004*].

В местах с осадками насыпи, в том числе на произошедших провалах и за их пределами, по данным ЭДЗ определены показатели прочности ($P_д$) и вид грунтов по силе тока I (рис. 13, 14). Для точек зондирования Э на этих рисунках отдельно для каждого участка указаны их номера, местоположение в продольном направлении (пикет ПК + м), сторонность и расстояние (м) от оси пути в поперечном направлении. При $P_д \leq 3$ МПа грунты относят к слабым. Например, на 267-м километре Свердловской железной дороги слабые грунты в зоне основной площадки (2.9 м слева и

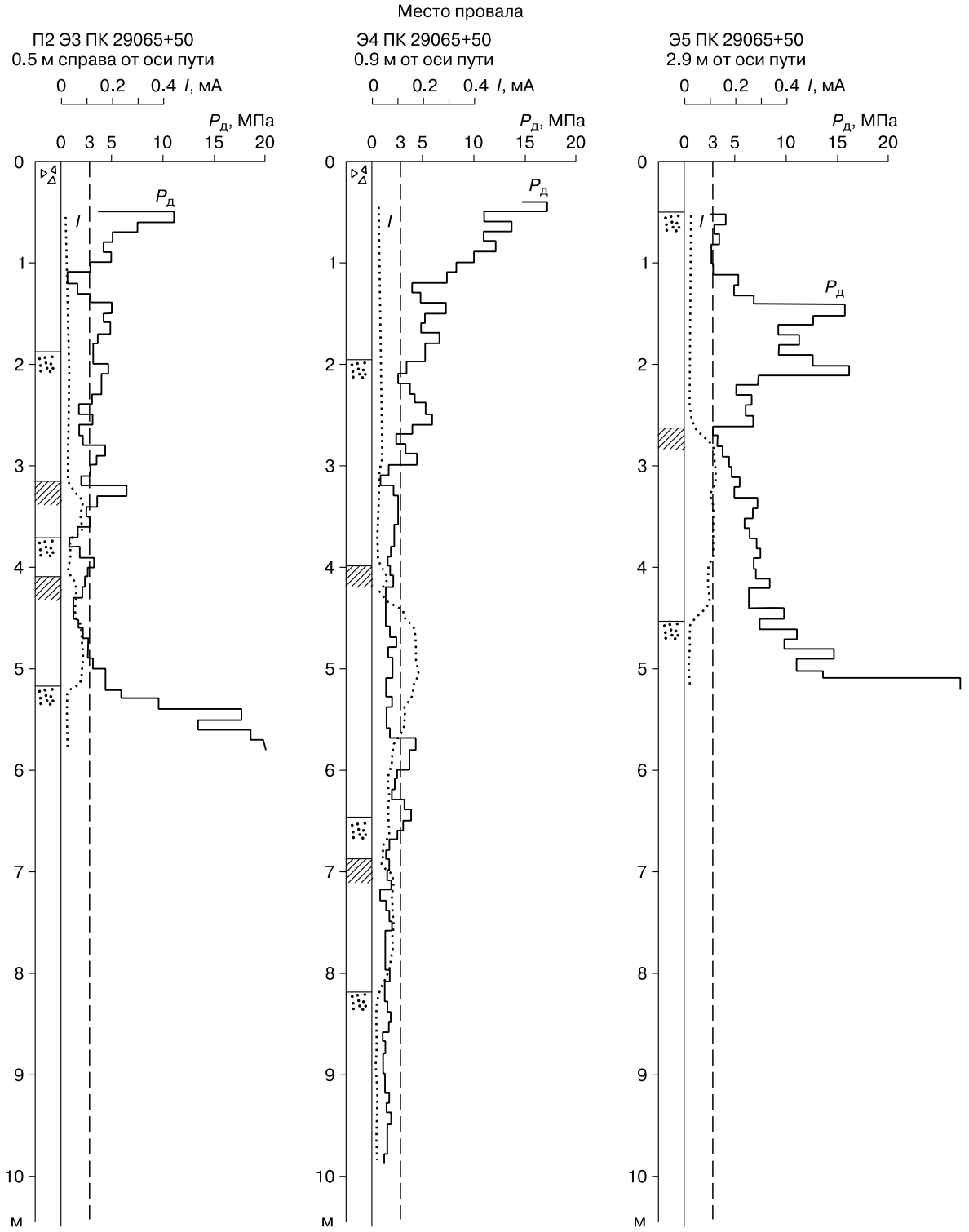


Рис. 14. Графики распределения условного динамического сопротивления $P_д$ и силы тока I по глубине (Дальневосточная железная дорога).

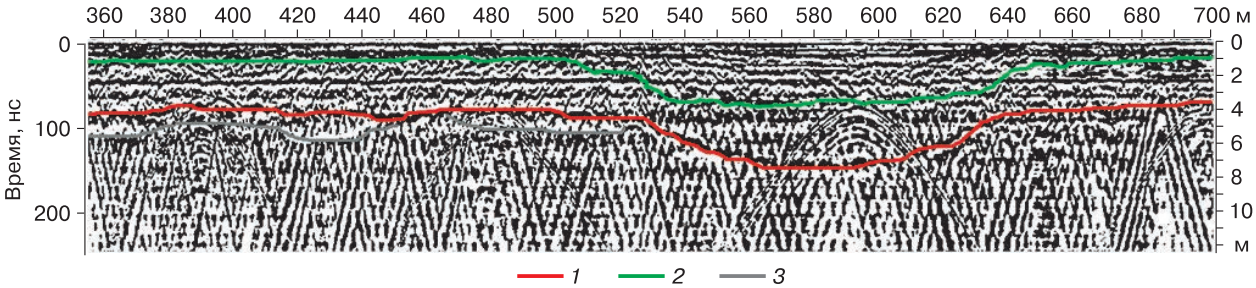


Рис. 15. Георадарный разрез по оси пути (267-й километр, ПК3+55–ПК7+00, Свердловская железная дорога).

1 – подошва насыпи; *2* – подошва балласта; *3* – граница раздела разнородных грунтов основания.

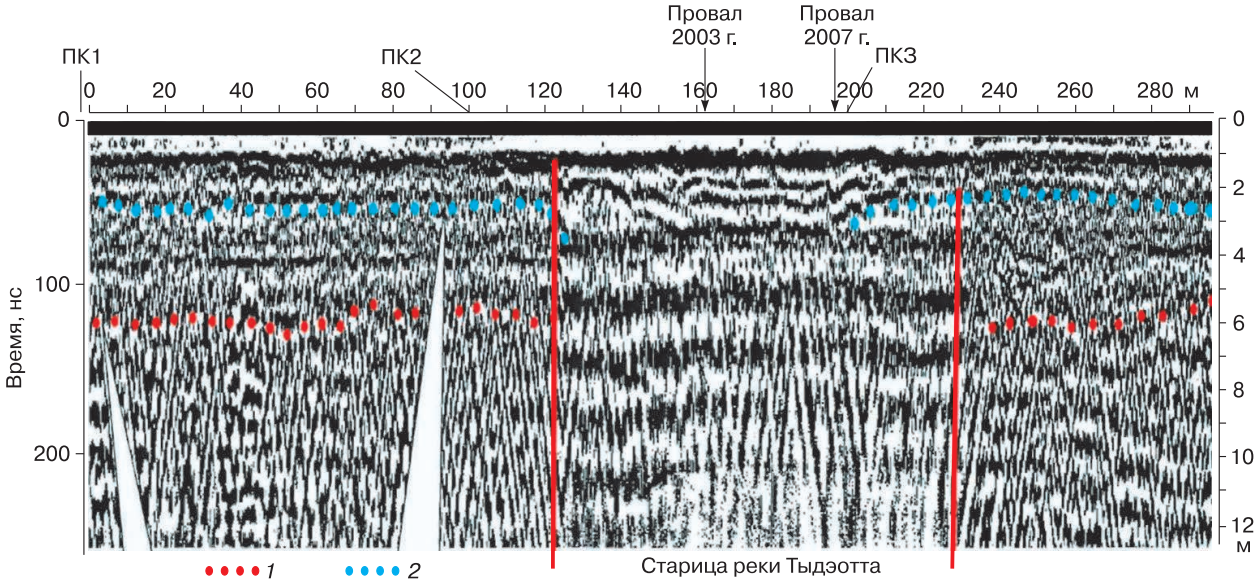


Рис. 16. Георадарный разрез по оси пути (489-й километр, ПК1–ПК3, Свердловская железная дорога).

1 – подошва насыпи; *2* – граница балласта.

Рис. 17. Бурение наклонной скважины станком УКБ-12.5/25.

справа) установлены до глубины 7 м. Это хорошо согласуется с результатами георадиолокационного зондирования. На георадарном разрезе (рис. 15) слабые грунты зафиксированы в пределах ПК5+20–ПК6+40. Зондирование выполнено с использованием георадара “ЛОЗА” [*Геофизический комплекс..., 2012*], электромагнитные сигналы которого не затухают в глинистых грунтах.

По результатам георадиолокации устанавливают границы участков с деформациями, в пределах которых изменяется характер прохождения электромагнитных сигналов (рис. 15, 16).

При обнаружении провала в качестве противоаварийного мероприятия выполняют заливку цементного раствора через забитые трубы диаметром 75 мм с коническим наконечником, который

а *б*

Рис. 18. Общий вид конструкции с длинномерными термосифонами после установки (*а*) и в зимний период (*б*).

оставляют в грунте. Трубы при заливке раствора поднимают и повторно забивают. Раствор заливают на площади провала через 0.4–0.7 м.

Бурение скважин при устройстве длинномерных термосифонов показано на рис. 17. Вид установленных конструкций в пределах Свердловской железной дороги приведен на рис. 18 (267-й км) и рис. 19 (366-й км).

Удерживающие конструкции из гофрированных элементов для устранения осадок и расползания насыпей на оттаивающих вечномерзлых грунтах выполняют в соответствии с требованиями [*ЦПИ-38, 2006*]. Обследование деформирующегося участка и предлагаемое техническое решение по его стабилизации удерживающими конструкциями показано на рис. 20. Гофрированные листы в плане располагают под углом 20° к продольной оси пути через 3 м.

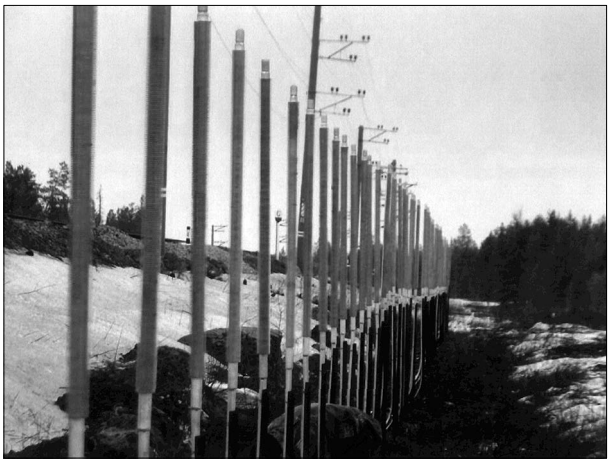
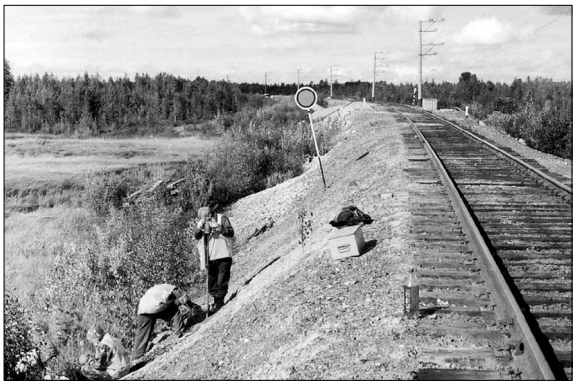


Рис. 19. Вид термосифонов из алюминиевого сплава после установки (366-й километр линии Ноябрьск–Коротчаево).

а *б*



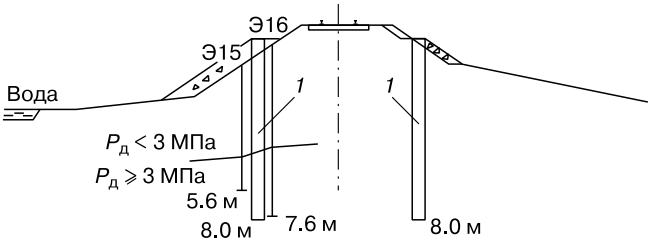


Рис. 20. Электроконтактное динамическое зондирование на деформирующейся откосной части насыпи (*а*) и удерживающие конструкции из гофрированных элементов (*1*) для ее стабилизации (пикет ПК 3358+56, Свердловская железная дорога) (*б*).

Основные положения по проектированию противодеформационных конструкций земляного полотна на вечной мерзлоте даны в работах [*Дыдышко, 2011, 2014*].

ВЫВОДЫ

По результатам экспериментальных исследований, включающих натурные наблюдения с использованием геофизических методов электроконтактного динамического зондирования и георадиолокации, а также теплотехнические расчеты методами математического моделирования, установлены причины деформаций земляного полотна на оттаивающих вечномерзлых грунтах. После сооружения земляного полотна из-за изменившихся условий теплообмена верхняя граница вечной мерзлоты опускается на глубину 6–10 м от верха насыпи. Деформации происходят вследствие вытаивания ледяных прослоев (начальная просадочность) и реологических процессов – выдавливания слабых грунтов из-под насыпи, которое характеризуется как длительная просадочность. Для устранения деформаций необходимо замораживать грунты в зоне подошвы откосов насыпи или создавать механическую преграду выдавливанию.

Разработан комплекс организационно-технических мероприятий, направленный на рекультивацию прилежащей к насыпи зоны, отвод воды и сооружение противодеформационных конструкций.

По результатам натурных наблюдений и расчетов разработаны нормативно-технические требования к длинномерным термосифонам, тепловой изоляции из пенопласта, удерживающим конструкциям из гофрированных элементов и другим противодеформационным техническим решениям. Нормативные документы по стабилизации земляного полотна утверждены для применения, получены патенты на изобретения.

В целях повышения безопасности движения поездов и снижения эксплуатационных расходов железных дорог ОАО "РЖД" предлагается разработать долгосрочную программу стабилизации земляного полотна железнодорожного пути на участках вечной мерзлоты. Ежегодно потребуется устраивать не менее 25 км противодеформационных конструкций, стоимость которых составит 200–300 млн руб. в год. Расчетная эффективность прогнозируется ориентировочно 2500 тыс. руб./км.

Литература

Геология зоны БАМ. Т. 2. Гидрогеология и инженерная геология. Л., Недра, 1988, 447 с.

Kozlovskiy, E.A. (Ed.), 1988. Geology of the BAM Zone. Book 2. Hydrogeology and Engineering Geology. Nedra, Leningrad, 447 pp. (in Russian)

Геофизический комплекс для определения границ геологических слоев серии "ЛОЗА". М., ООО "Компания ВНИИСМИ", 2012, 1 с.

LOZA Georadar System for Detection of Layer Boundaries, 2012. OOO "Kompaniya VNIISMI", Moscow, 1 pp. (in Russian)

Дыдышко П.И. Деформации насыпей на мари, их устранение и предупреждение // Ж.-д. транспорт. Сер. Путь и путевое хозяйство, 1991а, вып. 4, с. 17–32.

Dydyshko, P.I., 1991a. Deformation of subgrades in paludal areas, its mitigation and prevention. ZH.-D. Transport. Ser. Put` i Putevoe Khoziaistvo, Issue 4, 17–32. (in Russian)

Дыдышко П.И. Термоэлектрокинетическое явление в капиллярных анизотермических системах // Журн. физ. химии, 1991б, т. 65, вып. 12, с. 3169–3188.

Dydyshko, P.I., 1991b. Thermoelectrokinetics in thermally anisotropic capillary systems. Zhurn. Fiz. Khimii, 65 (12), 3169–3188. (in Russian)

Дыдышко П.И. Термоэлектрокинетическое явление в грунтах и других капиллярных системах при их анизотермическом состоянии // Вестн. ВНИИЖТ, 1992, № 1, с. 12–17.

Dydyshko, P.I., 1992. Thermoelectrokinetics in soils and other thermally anisotropic capillary systems. Vestnik VNIIZHT, No. 1, 12–17. (in Russian)

Дыдышко П.И. Проектирование земляного полотна железнодорожного пути: справ. пособие / П.И. Дыдышко. М., Интекст, 2011, 152 с.

Dydyshko, P.I., 2011. Railway Subgrade Design. A Handbook. Intekst, Moscow, 152 pp. (in Russian)

Дыдышко П.И. Земляное полотно железнодорожного пути. Справочник / П.И. Дыдышко. М., Интекст, 2014, 416 с.

Dydyshko, P.I., 2014. Railway Subgrade. A Handbook. Intekst, Moscow, 416 pp. (in Russian)

Инженерная геология СССР. Т. 2. Западная Сибирь. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, 496 с.

Sergeev, E.M. (Ed.), 1976. Engineering Geology of the USSR. Book 2. West Siberia. Moscow University, Moscow, 496 pp. (in Russian)

Покрытие откоса земляного полотна: пат. 1139176 / Цуканов Н.А., Пассек В.В., Заковенко В.В., Дыдышко П.И., Евстигнеев Р.И. Заявл. 19.09.1983; опубл. 27.10.1995. Бюро патентов СССР.

Tsukanov, N.A., Passek, V.V., Zakovenko, V.V., Dydyshko, P.I., Evstigneev, R.I., 1983. Filling of Embankment Slopes. Patent 1139176. Claimed on 19.09.1983. Published on 27.10.1995. Patent Bureau of the USSR. (in Russian)

Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов на пороге XXI века // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 1, с. 3–16.

Roman, L.T., 2002. Mechanics of frozen soils at the turn of the 21st century. Earth's Cryosphere, VI (1), 3–16. (in Russian)

Способ стабилизации насыпи удерживающими конструкциями из стальных гофрированных листов: пат. 2374392 / Дыдышко П.И., Марьомаа П. Патентообладатель ОАО "РЖД"; заявл. 19.05.2008; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33.

Dydyshko, P.I., Mariomaa, P., 2009. A method for subgrade stabilization by retaining structures of channelled plate steel. Patent 2374392. Patent Holder OAO RZD. Claimed on 19.05.2008. Published on 27.11.2009, Bull. 33.

СТН Ц-01-95. Железные дороги колеи 1520 мм. (Утв. приказом МПС России 25.09.95 г. № 14Ц, действ. с 01.01.1996). М., Транспорт, 1995, 87 с.

CES C-01-95, 1995. Construction Engineering Structures: Railways, tracks 1520 mm. Approved by the Order of the Ministry of Railroads on 25.09.95, No. 14C, effective since 01.01.1996. Transport, Moscow, 87 pp. (in Russian)

Технические указания по стабилизации деформирующихся насыпей железных дорог, расположенных на протаивающих основаниях из вечномерзлых грунтов: Утв. Гл. управлением пути МПС России 11.05.1993. М., 1993, 98 с.

Engineering Guidelines, 1993. Stabilization of Deforming Railway Subgrade upon Thawing Permafrost. Approved by the Main Administration of the Ministry of Railroads on 11.05.1993. Moscow, 98 pp. (in Russian)

ЦПИ-36. Руководство по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтов земляного полотна. (Утв. Департаментом пути и сооружений ОАО "РЖД" 30.01.2004). М., Транспорт, 2004, 84 с.

CPI-36, 2004. Determination of mechanical properties of ballast and subgrade soils. Approved by the Department of Railroads, OAO RZD on 30.01.2004. Transport, Moscow, 84 pp. (in Russian)

ЦПИ-38. Технические указания и конструкторская документация по способам стабилизации земляного полотна (для опытного применения). (Утв. Департаментом пути и сооружений ОАО "РЖД" 18.12.2006). М., ВНИИЖТ, 2006, 74 с.

CPI-38, 2006. Engineering guidelines and design documents on methods of railroad stabilization (for experimental use). Approved by the Department of Railroads, OAO RZD on 18.12.2006. VNIIZT, Moscow, 74 pp. (in Russian)

ЦПИ-40. Технические указания по устранению осадок насыпей на вечной мерзлоте замораживанием оттаивающих грунтов длинномерными термосифонами. (Утв. Департаментом пути и сооружений ОАО "РЖД" 03.07.2007). М., НИИТКД, 2009, 40 с.

CPI-40, 2009. Engineering guidelines for mitigation of subgrade settlement on permafrost by freezing of thawing soils by long thermosyphons. Approved by the Department of Railroads, OAO RZD on 03.07.2007. NIITKD, Moscow, 40 pp. (in Russian)

Thermoelectrokinesis.ru (дата обращения: 12.11.2011).

Поступила в редакцию
25 декабря 2014 г.