УДК 551.345

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ ТРАССЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА УЧАСТКЕ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА

Варламов С.П., Скрябин П.Н.

ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

Обобщены материалы инженерно-геокриологического мониторинга железнодорожной линии Томмот – Нижний Бестях на участке распространения пород ледового комплекса. Натурные исследования выявили, что высокая насыпь в годовом цикле оказывает более слабое охлаждающее влияние на грунты его основания, чем низкая. При отсыпке нулевой насыпи с заменой грунтов сезоннопротаивающего слоя в её основании формируется многолетняя чаша протаивания. Рекомендованы мероприятия обеспечивающие устойчивость земляного полотна железной дороги.

Ключевые слова: земляное полотно, ледовый комплекс, многолетнемерзлые грунты, температурный режим грунтов

THERMAL STATE OF ICE-RICH PERMAFROST ALONG THE RAILROAD CORRIDOR

Varlamov S.P., Skryabin P.N.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

This paper provides an analysis of geocryological monitoring data from a section of the Tommot to Nizhny Bestyakh Railroad underlain by ice-rich permafrost. Observations have shown that the annual cooling effect of higher embankments is less than that of lower embankments. The placement of a zero embankment with removal of the active layer has been found to result in a perennial thaw bulb. Measures are proposed to maintain the stability of the railroad embankment.

Keywords: embankment, ice-rich permafrost, ground temperature regime

Железнодорожная линия Томмот-Нижний Бестях на 692–734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса, где льдистость достигает 0,7–0,8 в долях единицы. Это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок [1, 3].

Проблемы ледового комплекса рассматривались на научно-техническом совете и семинаре-совещании, проведенных в г. Якутске [2, 4]. По итогам обсуждений обоснована организация системы инженерно-геокриологического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации железной дороги на этом участке, как опытного полигона в экстремальных условиях. После первых лет эксплуатации железной дороги предусматривается проектирование дополнительных мероприятий, обеспечивающих устойчивость земляного полотна. Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН с 2007 г. проводит на этом участке экспериментальные исследования за тепловым состоянием грунтов основания земляного полотна и прилегающей к трассе территории.

Оценка изменений теплового состояния грунтов в период строительства и эксплуатации железной дороги проводится по результатам мониторинговых исследований. В данной работе анализируется формирование температурного режима грунтов основания высоких, низких и нулевых насыпей различной конструкции.

Материалы и методы исследования

Исследования выполняются методом инженерно-геокриологического мониторинга. Для этого в системе железнодорожное полотно – окружающая среда в 2007–2010 гг. была организована в различных мерзлотных ландшафтах наблюдательная сеть, включающая 9 поперечных профилей, привязанных к пикетам (ПК) дороги: межаласья (ПК 7088, 7089, 7175 и 7179), ложбины стока (ПК 6926 и 7087), склоны (ПК 6924, 6932 и 6934). Бурение скважин и их оборудование для режимных температурных наблюдений под основания земляного полотна были проведены после вырубки просек трассы и до начала их отсыпки, в районе ПК 7179 – после возведения нулевой насыпи, а на окружающей территории (просека, лес) во время возведения насыпей. Для режимных термических наблюдений оборудовано 44 скважины. В устройстве обсадки скважин и отводов термогирлянд из-под будущих насыпей железнодорожного полотна использованы полипропиленовые трубы.

Вырубка просек трассы проведена в зимние месяцы 2006–2008 гг., возведение насыпей – с апреля 2009 г. по сентябрь 2010 г., укладка шпалорельсов в конце теплого периода 2010 г. Процессы отсыпки насыпей были произведены круглогодично.

В теплый сезон 2010 г. строителями сооружены из скального грунта насыпи разных конструкций в районе пикетов: ПК 6924 – насыпь на выемке; ПК 6926 – насыпь высотой 7 м с установкой на бермах сезоннодействующих охлаждающих устройств

(СОУ) до глубины 4 м; ПК 6932 – насыпь высотой до 2,5–3,0 м с установкой на бермах СОУ и укладкой на основании бермы и насыпи теплоизоляционного материала из пеноплекса толщиной 5 см и шириной 8 м; ПК 6934 – насыпь высотой 7 м; ПК 7087 – насыпь высотой 2,5 м с субвертикальными охлаждающими откосами; ПК 7088 – насыпь высотой 2,5–3,0 м с консольным солнцезащитным и снегоудерживающим навесом на откосах; ПК 7089 – насыпь высотой до 2,5 м с установкой на бермах СОУ и укладкой на основании бермы и насыпи теплоизоляционного слоя пеноплекса; на ПК 7175 сооружено земляное полотно сложной конструкции. Насыпь высотой 2–2,5 м отсыпана с частичным удалением грунта деятельного слоя. Слева насыпи отсыпана высокая берма высотой до 5 м, справа – берма высотой до 3 м. Под бермами и насыпью уложены гофрированные трубы для дренажа и охлаждения грунтов основания насыпи; на ПК 7179 сооружена нулевая насыпь из скального грунта мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротаивающего слоя.

Общепринятыми индикаторами изменения теплового режима верхних горизонтов криолитозоны считаются: глубина сезонного протаивания (ξ) и среднегодовая температура грунтов на глубине 10 м (t_0). Натурные наблюдения проводятся за факторами, определяющими тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны: высота и плотность снежного покрова; строение, состав и влажность грунтов; криогенные процессы.

Объектами исследований являются грунты слоя годовых теплооборотов до глубины 10–15 м в естественных ландшафтах (в лесу и на мари) и на просеках, насыпи и грунты их основания до глубины 5–10 м. В качестве датчиков температуры грунтов использованы полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений ± 0,1 °С. Измерения температуры грунтов в скважинах в естественных ландшафтах и на просеках проводились на глубинах 0,3; 1,0; 2,5; 5,0; 7,5 и 10,0 м, под основания насыпей на глубинах 0,3; 1,5; 3,0 и 5,0 м. В режимных скважинах термогирлянды установлены стационарно и стволы их заполнены ранее извлеченным грунтом. Мощность сезонноталого слоя (СТС) определяется в конце теплого периода (середина сентября) с помощью металлического щупа и ручного бура. Снегомерные работы проводились в декабре и апреле. Комплексные наблюдения проводятся с периодичностью 4 раза в год.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе анализа данных геокриологического мониторинга оценены изменения основных параметров термического состояния грунтов (таблица). Наибольшая мощность снежного покрова равная 64–65 см формируется на просеках под влиянием ветрового переноса в ложбинах стока (ПК 6926 и 7087). При вырубке лесов в межаласных участках (ПК 7088 и 7089) средняя влажность сезонноталого слоя сокращается до 27–42 %. Наиболее заметное повышение t_0 на 0,7–1,2 °С отмечается на просеках, проложенных вдоль склонов (ПК 6934) и на водоразделах в межаласье (ПК 7088 и 7089). Максимальная мощность сезонноталого слоя равная 1,9–2,3 м установлена в ложбине стока (ПК 7087) и в межаласье (ПК 7088). Повышение t_0 и увеличение ξ на сильнольдистых участках сопровождается тепловой просадкой грунтов, что не допускается при эксплуатации железной дороги.

Мощность сезоннопротаивающего слоя в лиственничном лесу с западной и восточной стороны от просеки за 7 летний период не выходила за пределы 0,72–1,00 м. Разность между максимальными и минимальными значениями ξ в лесу слева и справа от просеки составила 0,23 и 0,11 м соответственно (рис. 1). Таким образом, основными факторами влияющими на ξ являются затеняющая роль древостоя и теплоизолирующее воздействие мохово-брусничного покрова.

Температура грунтов на глубине 5 м в конце теплого сезона колеблется от – 2,3 до – 2,6 °С (рис. 2). Межгодовая изменчивость t_0 составляет 0,1–0,3 °С, что свидетельствует о ее слабой реакции на современные изменения метеорологических условий.

В районе ПК 6934 грунты сезонноталого слоя находятся в более переувлажненных условиях, т.к. находятся на более низких гипсометрических отметках с относительно большими уклонами. Мощность сезонноталого слоя в первый сезон после вырубки просеки в 2007 г. составила 0,90–1,03 м, во второй сезон она увеличилась на 0,04–0,24 м. Температура грунтов на глубине 5 м к 23 сентября 2007 г. изменилась в пределах – 1,9…– 2,2 °С. К осени 2008 г. она повысились на 0,1–0,2 °С. После отсыпки насыпи высотой 3–4 м в грунтах ее основания в зимний период 2008/09 гг. отмечено заметное охлаждение. В сентябре 2009 г. под насыпью высотой 7 м по температурным данным верхняя граница многолетнемерзлых пород была приподнята более 1 м под осью насыпи, около 1 м – под правым нижним откосом и менее 0,5 м под левым откосом. Температура грунтов по оси насыпи на глубине 5 м за 6 лет изменялась в пределах от – 2,0 до – 2,6 °С.

Температура грунтов основания насыпи на этой глубине под основанием правого откоса в первый зимний сезон составила – 5,3 °С. Здесь наблюдается более интенсивное охлаждение грунтов, чем на оси трассы. Грунты основания насыпи на нижней части левого откоса, наоборот, охладились значительно меньше (– 1,5 °С). Это связано с повышением уровня надмерзлотных вод сезонноталого слоя у основания насыпи и потерей запаса холода на фазовые переходы при промерзании грунтов этого слоя. В сентябре 2010 г. отмечено понижение температуры грунтов основания по оси на-

сыпи по сравнению с предыдущим сезоном на 0,1–0,3 °С, на нижней части правого откоса на 0,6–1,3 °С и повышение её на нижней части левого откоса на 0,1–0,2 °С. Зимой 2011 г. грунты на оси основания насыпи не аккумулировали холод. Здесь в температурном режиме наметилась тенденция к его повышению. Такая же картина наблюдается на нижней части левого откоса насыпи. На нижней части правого откоса насыпи, наоборот отмечена заметная аккумуляция холода, но с меньшей интенсивностью, чем в предыдущую зиму. К концу теплого сезона 2011 г. мощность сезонноталого слоя у правого основания насыпи почти не изменилась и составила 1,10 м, у левого основания достигла более 1,80 м. Температура грунтов на глубине 5 м по сравнению с предыдущим сезоном повысилась и составила соответственно на оси трассы – 2,1 °С, под правым откосом основания насыпи – – 3,1 °С, под левым – – 1,5 °С.

Основные параметры термического состояния грунтов

Ландшафты	Участок	Высота снега, см	Влажность напочвенного покрова, %	Влажность сезонно-талого слоя, %	Мощность СТС, м	Температура на глубине 10 м, °С
Межаласье	Лес	30–60	16–32	46–177	0,68–1,75	– 2,0…– 2,5
(ПК: 7088, 7089, 7175)	Просека	40–64	22–152	23–42	0,90–2,28	– 1,0…– 2,1
Склоны	Лес	40–62	24–62	24–33	0,72–1,10	– 2,0…– 2,6
(ПК: 6932, 6934, 7179	Просека	37–63	23–197	26–68	1,10–1,87	– 1,8…– 3,2
Ложбина стока	Лес	30–60	21–355	19–52	0,77–0,87	– 1,6…– 2,2
(ПК: 6926, 7087	Просека	45–68	38–382	26–90	1,02–1,55	– 1,6…– 2,0

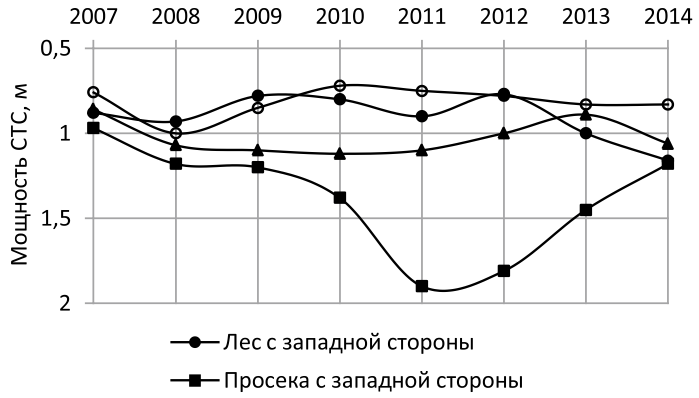

Рис. 1. Динамика мощности сезонноталого слоя в лесу и на просеках в районе ПК 6934

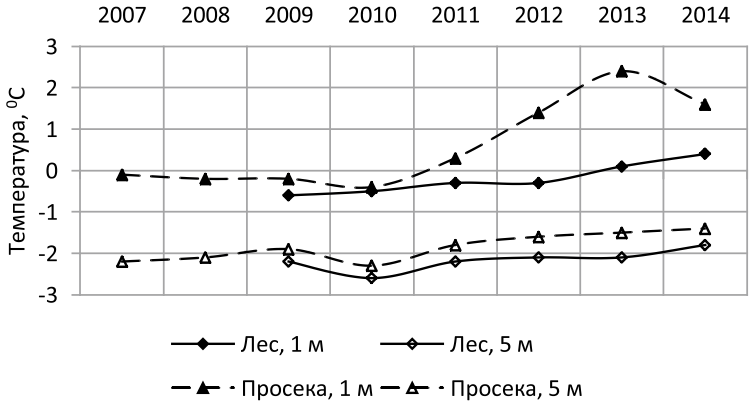

Рис. 2. Динамика температуры грунтов на разных глубинах в лесу и на просеке в районе ПК 6934

В 2013 г. температура грунтов основания насыпи на оси земляного полотна по сравнению с предыдущим годом заметно не изменилась. Однако, судя по температурным данным, верхняя кровля многолетней мерзлоты была существенно приподнята, чем на естественной поверхности и находилась выше основания тела земляного полотна (рис. 3). Температура грунтов основания насыпи на глубине 0,2 м составила в конце теплого периода 2013 г. – 0,9 °С. Грунты под правым откосам насыпи продолжают заметно охлаждаться, а под левым откосом не наблюдается заметных изменений, вследствие переувлажненности грунтов сезонноталого слоя. В 2014 г. в конце теплого сезона температуры грунтов под откосами основания на отметке 0,2 м составили справа – 0,1, а слева + 0,1 °С. Это подтверждает вывод, ранее высказанный нами, об отепляющем влиянии поверхностных вод на температурный режим земляного полотна.

В районе ПК 7088 в 2008 г. мощность сезонноталого слоя на просеке изменялась от 1,0 до 1,3 м, что на 0,2–0,5 м была больше чем в лесу. Здесь температура грунтов по сравнению лесным участком повысилась на 0,5–1,0 °С и на глубине 5 м составила – 1,2... – 1,3 °С. В апреле 2009 г. грунты аккумулировали холод только в верхнем 4-метровом слое. Температурный режим грунтов основания насыпей зимой 2009/2010 гг. после завершения сооружения земляного полотна с консольными деревянными навесами на откосах шириной более 1 м сформировался следующим образом. При промерзании талого слоя не происходило смыкания с многолетнемерзлыми породами. Сезоннопромерзающий слой на нижней части откоса насыпи сомкнулся с многолетнемерзлыми породами, но аккумуляция холода была незначительной и температура понизилась по сравнению осенними всего на 0,4–1,4 °С.

В первые две зимы консольные навесы на откосах насыпи не дали нужного охлаждающего эффекта в температурном режиме грунтов основания по краям насыпей. В 2013 г. температура грунтов основания насыпи по оси земляного полотна на отметках 0,2 и 1,5 м составила соответственно – 0,3 и – 0,4 °С. Верхняя кровля многолетнемерзлых пород отмечена почти на уровне естественной поверхности. Под правым откосом насыпи также отмечается слабое охлаждение грунтов (рис. 4). Верхняя кровля мерзлоты опустилась ниже на 0,3–0,5 м от уровня естественной поверхности. В 2012 и 2013 г.г. по температурным данным мощность СТС составила соответственно 2,7 м и 2,6 м, температура грунтов повысилась до – 1,1 °С. На каменной отсыпке слева у основания откоса насыпи мощность СТС составила 2,2–2,3 м и температура грунтов – 1,2 °С, следовательно, на этих участках начинается деградация мерзлоты.

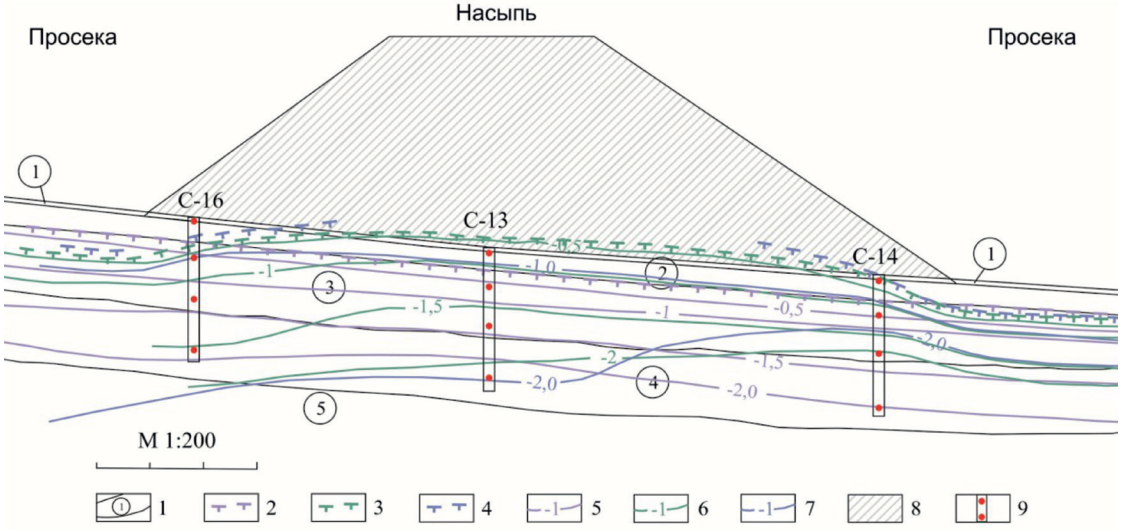

Рис. 3. Изменение термоизоплет грунтов и верхней границы многолетнемерзлых пород основаниями насыпей в районе ПК 6934: 1 – номер слоя грунтов: 1 – почвенно-растительный слой, льдистость (δ) – 0,10, 2 – суглинок мягкопластичный δ-0,10, 3 – суглинок текучий δ-0,27, 4 – суглинок текучий (льдистый) δ-0,62, 5 – суглинок мягкопластичный δ-0,13; верхняя граница многолетнемерзлых пород: 2 – в 2007 г., 3 – 2011 г., 4 – в 2013 г.; термоизоплеты грунтов: 5 – 23.09.2007 г., 6 – в 17.09.2011 г., 7 – 30.08.2013 г.; 8 – скальный грунт с заполнителем до 10%; 9 – термометрическая скважина

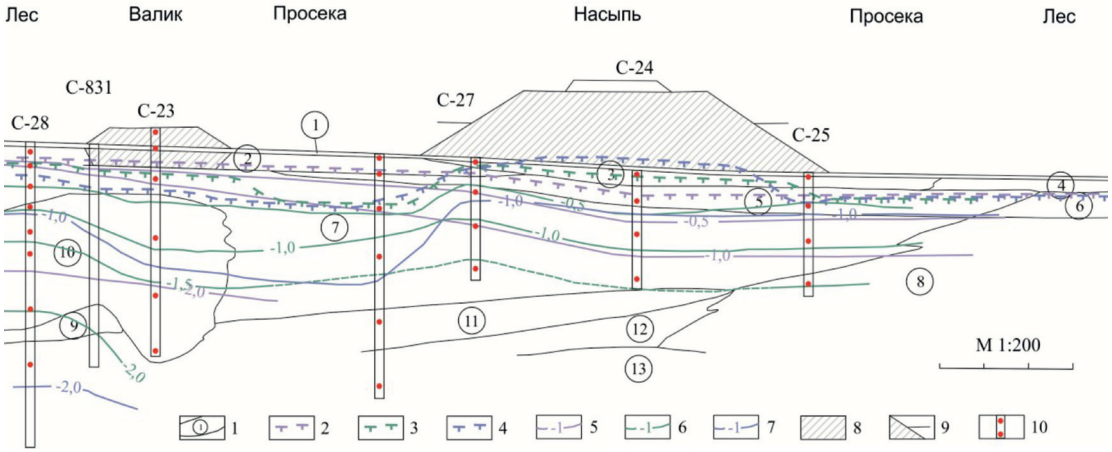

Рис. 4. Изменения термоизоплет грунтов и верхней границы многолетнемерзлых пород под основаниями насыпей в районе ПК 7088: 1 – номер слоя грунтов: 1 – почвенно-растительный слой насыщенный водой δ-0,35, 2 – супесь текучая δ-0,35, 3 – супесь пластичная δ-0,10, 4 – супесь твердая δ-0,01, 5 – супесь текучая δ-0,22, 6 – суглинок текучепластичный δ-0,15, 7 – супесь текучая δ-0,22, 8 – суглинок текучепластичный δ-0,15, 9 – суглинок текучий δ-0,33, 10 – лёд δ-0,95, 11 – ледогрунт δ-0,66, 12 – суглинок текучий льдистый δ-0,50, 13 – супесь текучая δ-0,27; верхняя граница многолетнемерзлых пород: 2 – в 2008 г., 3 – в 2011 г., 4 – в 2013 г.; термоизоплеты грунтов: 5 – в 26.08.2008 г., 6 – 17.09.2011 г., 7 – в 30.08.2013 г.; 8 – скальный грунт с заполнителем до 10%; 9 – солнцезащитный и снегоудерживающий навес; 10 – термометрическая скважина

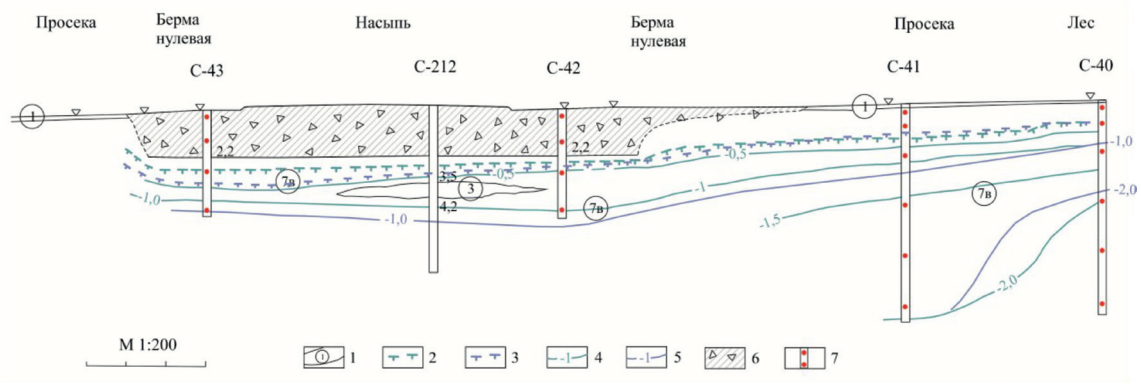

Рис. 5. Изменение термоизоплет грунтов и верхней границы многолетнемерзлых пород под основаниями насыпей в районе ПК 7179: 1 – номер слоя грунтов: 1 – почвенно-растительный слой, 2 – суглинок льдистый текучий δ-0,24, 3 – лёд; верхняя граница многолетнемерзлых пород: 2 – в 2011 г., 3 – в 2013 г.; термоизоплеты грунтов: 4 – в 17.09.2011 г., 5 – в 31.08.2013 г.; 6 – скальный грунт с заполнителем 10%; 7 – термометрическая скважина

В районе пикета 7179 бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после выемки грунтов сезоннопротаивающего слоя и возведения земляного полотна. При бурении скважин глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5–3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Итак, здесь были созданы условия формирования чаши протаивания грунтов в основании насыпи. Это подтверждают и температурные данные. Так, в зимний сезон в теле насыпи на глубине 1,5 м температура понижается до – 5,0 °С, а в летний сезон она повышается до 4,3–7,1 °С, и грунты на глубине 5 м остаются стабильно высокотемпературными (– 08…– 1,5 °С). По расчётам нулевая изотерма находится на глубине 2,8–3,2 м и, по-видимому, здесь промерзающий слой не смыкается с многолетнемерзлыми породами. В 2013 г. в конце теплого сезона температура грунтов на глубине 5 м составила – 0,8 и – 1,5 °С (рис. 5).

Выводы

Результаты исследований заключаются в следующем.

1. Период наблюдений характеризуется повышенными среднегодовыми температурами воздуха, многоснежными зимами. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов в естественных условиях свидетельствует о ее слабой реакции на современные колебания метеорологических условий.

2. Глубина сезонного протаивания грунтов на просеках увеличивается ежегодно, местами достигает верхнюю кровлю подземных льдов, начинается оттаивание многолетнемерзлых пород.

3. Высокая насыпь в годовом цикле оказывает слабое охлаждающее влияние на грунты его основания, а низкая насыпь – наоборот, сильное. При отсыпке нулевой насыпи с удалением грунтов сезоннопротаивающего слоя в её основании формируется многолетняя чаша протаивания.

4. Рекомендуется установить у более открытого основания левой части земляного полотна дополнительные сезонные охлаждающие устройства (СОУ) – термостабилизаторы, использовать метод тепловой мелиорации: регулярное удаление снежного покрова или его уплотнение.

5. Инструментальное и визуальное обследования земляного полотна в период временной эксплуатации выявили участки подверженные опасным деформациям, поэтому рекомендуется ежегодное обследование земляного полотна всей трассы.

Авторы благодарны Министерству транспорта и дорожного хозяйства и Госкомитету по инновационной политике и науки Республики Саха (Якутия) за финансовые поддержки в организации наблюдательной сети и проведении инженерно-геокриологического мониторинга в 2007–2013 гг.

Список литературы

1. Варламов С.П. Льдистость грунтов северного участка проектируемой железной дороги Томмот-Кердем (ст. Олень – ст. Кердем) // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы Международной конференции. □ Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – Т. 2. – С. 212–214.

2. Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса»: Материалы семинара-совещания, Якутск, 2007. – 165 с.

3. Позин В.А., Королев А.А., Наумов М.С. «Ледовый комплекс» Центральной Якутии как опытный полигон железнодорожного строительства в экстремальных инженерно-геокриологических условиях // Инженерная геология. – 2009. – № 1. – С. 12–18.

4. Проектирование и строительство земляного полотна железной дороги Томмот-Кердем в сложных инженерно-геокриологических условиях (Итоги инженерных изысканий в 2005 г.): Материалы научно-технического совета. – Якутск, 2005. – 118 с.