

С. П. Варламов

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Аннотация. Рассматривается проблема тепловой реакции верхних льдистых горизонтов криолитозоны на техногенные воздействия линейных сооружений на примере железной дороги в экстремальных инженерно-геокриологических условиях на фоне современного потепления климата. Обоснованы актуальность, научная и практическая значимость исследуемой проблемы, кратко охарактеризованы особенности геокриологических условий участка работ. Рассмотрены методика и организация наблюдательной сети опытного полигона железнодорожного строительства. Представлены результаты инженерно-геокриологического мониторинга железнодорожной линии Томмот – Нижний Бестях на участке распространения пород ледового комплекса, где использовали инновационные проектирования. Количественно оценена динамика теплового состояния грунтов основания и тела земляного полотна железной дороги при широком применении вертикальных сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) и теплоизоляционных материалов. Установлено поднятие верхней кровли многолетнемерзлых пород и охлаждения грунтов основания под высокими и низкими насыпями, увеличение мощности сезоннопротаивающего слоя и повышение среднегодовой температуры грунтов на просеках вдоль земляного полотна. Выявлено формирование многолетней чаши протаивания, угрожающее устойчивости земляного полотна при отсыпке нулевой насыпи с удалением сезонно-талого слоя в её основании. Отмечена деградация мерзлых пород ледового комплекса на откосах и днищах выемок. Оценена охлаждающая эффективность применения СОУ на бермах в сочетании теплоизоляционным материалом из пеноплекса на земляное полотно и верхнюю кровлю многолетнемерзлых пород. Конструкции консольных солнцезащитных навесов на откосах насыпи оказали должное охлаждающее эффекта на грунты основания земляного полотна. Экспериментальные данные являются информационной основой для прогноза термического режима грунтов основания земляного полотна и прилегающей территории в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: ледовый комплекс, многолетнемерзлые грунты, земляное полотно, температура грунта, мощность деятельного слоя, мониторинг, динамика.

S. P. Varlamov

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

THE SOIL THERMAL PROPERTIES IN THE IMPACT ZONE OF RAILWAY IN CENTRAL YAKUTIA

Abstract. The problem of the thermal reaction of the upper ice horizons of the cryolithozone on the technogenic impact of linear structures was considered on the example of the railway in extreme geotechnical conditions and modern climate warming. The relevance, scientific and practical significance of the problem under study are substantiated, the features of the geocryological conditions of the work site are briefly characterized. The technique and organization of the observation network of the experimental railway construction site are considered. The results of engineering-geocryological monitoring of the railway line Tommot – Nizhny Bestyakh on the area of distribution of rocks of the ice complex, where innovative design was used, are

¹ *ВАРЛАМОВ Степан Прокопьевич* – к.г.н., с.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

E-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

VARLAMOV Stepan Prokopievich – Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS.

E-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

presented. The thermal dynamics of the subgrade and embankment soils were quantified associated with the wide use of thermosyphons and insulation materials. The observations indicated a rise in the permafrost table and cooling of the subgrade under high and low embankments, and increased seasonal thaw depths and ground temperature warming on the right-of-way along the railroad. Where a zero embankment was placed with removal of the active layer, perennial thaw bulbs developed in the subsoil. Degradation of ice-rich permafrost was observed on the cut slopes and ditches in the cut sections. Thermosyphons on the berms in combination with Penoplex insulation showed a cooling effect on the subgrade and permafrost table. Overhanging snow sheds on the embankment slopes proved to be beneficial for reducing subgrade temperatures. The experimental data serve an information basis for the forecast of the thermal regime of the soil of the base of the roadbed and the surrounding area in a changing climate.

Keywords: ice complex, permafrost, roadbed, soil temperature, active-layer thickness, monitoring, dynamics.

Введение

Оценка теплового состояния грунтов основания геотехнических систем при потеплении климата является приоритетной проблемой геокриологии. Железнодорожная линия Томмот – Нижний Бестях на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса, где суммарная объемная льдистость грунтов в слое годовых теплооборотов достигает 0,7-0,8 долей единицы [1, 2]. По льдистости и просадочности они относятся к сильнольдистому, сильнопросадочному (IV категория), а с крупными включениями подземного льда, чрезмерно просадочному (V категория) типам грунтов. Тип грунта по льдистости и просадочности в сезоннопротаивающем слое и подстилающей многолетнемерзлой толще дан по ВСН 84-89 [3]. Повторно-жильные льды залегают в интервале глубин 1,5-12,0 м.

Проблемы ледового комплекса рассматривались на научно-техническом совете и семинаре-совещании, проведенные в городе Якутск [4, 5]. По итогам обсуждений было принято решение об организации системы мониторинга на стадии строительства и эксплуатации железной дороги на этом участке, как опытного полигона железнодорожного строительства в экстремальных инженерно-геокриологических условиях. Строительство земляного полотна железной дороги было выполнено по специально разработанному проекту, где предусматривалось использование инновационных технологий для сохранения грунтов оснований в мерзлом состоянии при ее эксплуатации. Строители широко применяли теплоизоляционные материалы из пеноплекса в теле и основании насыпей, солнцезащитные консольные деревянные досчатые навесы на откосах насыпей и выемок, вертикальные парожидкостных сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) на бермах низких насыпей, гофрированные трубы диаметром 20 см в теле насыпи на различных глубинах и на основании высоких брем и др.

Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН с 2007 г. проводит здесь экспериментальные исследования за тепловым состоянием грунтов основания земляного полотна и прилегающей территории.

Организация наблюдательной сети, объекты и методика исследований

В 2007-2010 гг. на участке распространения пород ледового комплекса была организована наблюдательная сеть за термическим режимом грунтов основания и тела земляного полотна, и грунтов прилегающей к дороге территории. Сеть охватила различные мерзлотные ландшафты, включающие поперечные профили, привязанных к пикетам (ПК) железной 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 вырубке просек трассы и до начала их отсыпки, в районе ПК: 6924, 7005 – после сооружения выемок, 7179 – после возведения нулевой насыпи, а на окружающей территории (просека, лес, марь) во время возведения насыпей.

Вырубка просек трассы проведена в зимние месяцы 2006-2008 г.г., 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 (табл.).

Экспериментальные наблюдательные площадки

Местоположение площадок	Конструкция насыпи
ПК 6924, 7005	Насыпи на выемках
ПК 6926	Насыпь высотой 7 м с установкой на бермах вертикальных парожидкостных сезонно охлаждающих установок (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 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
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 в теле насыпью уложены гофрированные трубы для дренажа и охлаждения грунтов основания насыпи
ПК 7179	Сооружена нулевая насыпь из скального грунта мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротавивающего слоя.

Объектами исследований являются грунты слоя годовых теплооборотов до глубины 10 м в естественных природных комплексах и на просеках, грунты основания и тела земляного полотна до глубины 5-10 м. Регистраторами температуры грунтов используются полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1°C. Замеры температуры грунтов в скважинах проводятся стационарно установленными терморезисторными гирляндами. В устройстве термической обсадки скважин и отводов термогирлянд из-под будущих насыпей железнодорожного полотна были использованы полипропиленовые трубы, уложенные на глубине 0,2-0,3 м.

Результаты исследований за температурным полем грунтов основания насыпей в первые годы наблюдений были опубликованы в ранних работах [6-9, 10]. В данной работе дается анализ теплового состояния грунтов основания земляного полотна и прилегающей территории по итогам 10-11-летних наблюдений.

Результаты исследований и их анализ

Анализ изменения теплового поля грунтов прилегающей к земляному полотну территории проводился на основе результатов исследований на 6 экспериментальных поперечных профилях. Межгодовые вариации параметров теплового режима грунтов существенно зависят от климатических характеристик. В связи с незначительной удаленностью района исследований средние годовые температуры воздуха можно охарактеризовать данными метеостанции Якутск. Наибольшая высота снежного покрова и температуры грунтов даны по осредненным показателям в лесу и на просеке по 6 участкам.

Средняя годовая температура воздуха по данным метеостанции Якутск за период 2008/09-2017/18 гг. изменяется в пределах -8,3...-6,2°C, в среднем составляя -7,45°C, при норме -10,0°C. За этот период тренд повышения составила 0,05°C/год (рис. 1а).

В районе исследований межгодовая изменчивость высоты снега в период максимального снегонакопления (конец марта – начало апреля) довольно значительная и изменяется в пределах: на мари 0,4-0,76 м, в лесу – 0,41-0,63 м, на просеке – 0,42-0,70 м. Наименьшие высоты снега отмечены в 2009 и 2010 годы, наибольшие – 2008, 2015 и 2016 годы (рис. 1б). В 2008-2018 гг. тренд повышения снежного покрова на мари, в лесу и на просеке соответственно составили 1,5, 1,64 и 0,59 см/год.

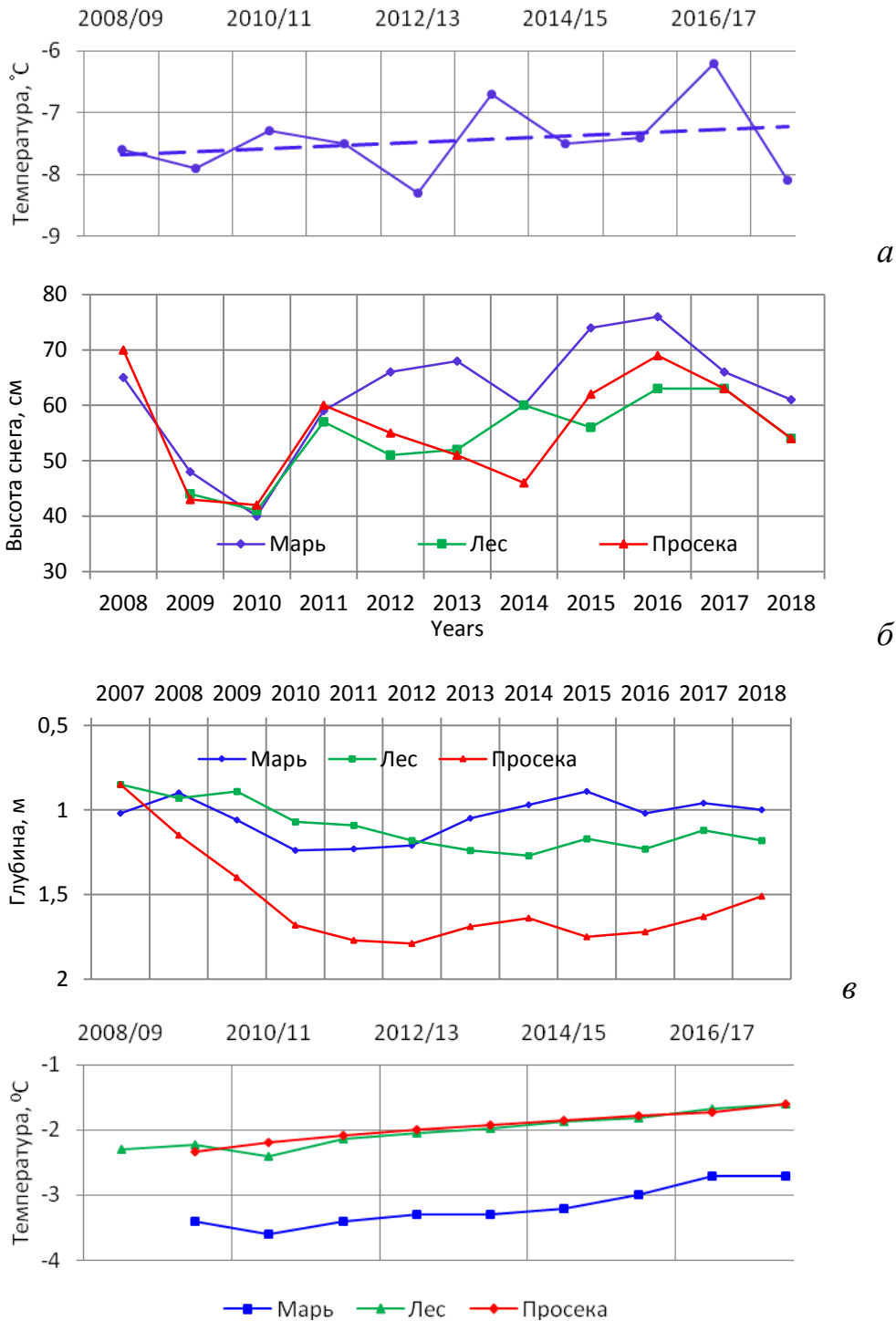


Рис. 1. Изменения средней годовой температуры воздуха в Якутске (а), максимальной высоты снежного покрова (б), мощности СТС (в) и температуры грунтов на глубине 10 м (г) в районе экспериментальных исследований на участке развития пород ледового комплекса вдоль земляного полотна железной дороги

Мощность СТС на мари изменяется в пределах 0,89-1,24 м, составляя в среднем 1,05 м, при этом наблюдается отрицательный тренд равный 1,00 см/год. В лесу мощность СТС на 6 участках изменяется от 0,85 до 1,27 м, составляя в среднем 1,10 м. На более освещенном открытом участке в отдельные годы мощность СТС увеличивается до 1,79 м. Тренд увеличения мощности СТС в лесу составляет 2,75 см/год. На просеках мощность СТС на 6 участках изменяется в пределах 0,85-1,79 м, составляя в среднем 1,55 м. В отдельные годы, экстремальная глубина протаивания достигает 2,67 м. Тренд увеличения мощности СТС на просеках составляет 4,33 см/год, в последние годы отмечается тенденция к восстановлению (рис. 1в). При залегании подземных льдов на глубине 1,5-2,0 м на просеках отмечается их оттаивание и просадки поверхности на этих участках.

Температура грунтов на глубине 10 м в 2009/10 гг. на мари, в лесу и на просеке соответственно составили -3,4, -2,2 и -2,3°C; в 2017/18 гг. температура повысилась повсеместно на 0,6-0,7°C (рис. 1г), тренды их соответственно были равны 0,09, 0,08 и 0,08°C/год.

Итак, на прилегающей к земляному полотну территории после возведение насыпи в связи с изменением микроклиматических условий наблюдается увеличение межгодовой изменчивости мощности снежного покрова. В связи с увеличением освещенности местности и нарушением теплообмена поверхности с атмосферой отмечено значительное увеличение мощности СТС на просеках, в меньшей мере – в лесу у просек. В лесных, маревых комплексах и на просеках повышение температуры грунтов на глубине 10 м составляет 0,5-0,7°C.

Анализ теплового состояние грунтов тела и основания земляного полотна за 2010-2018 гг.

В районе исследований высокие насыпи обычно приурочены на нижней части склонов, ложбинам стока, днищам долин ручьев и рек.

В районе ПК 6926 поперечный профиль оборудован на днище ручья в осенью 2007 г. после вырубке просеки на мари. Здесь сооружен земляное полотно высотой 7 м с бермой. Марь представляет мохово-травяной ерник. Моховой напочвенный покров мощностью до 0,1 м имеет влажность 123-355 %. Активный сезоннопротаивающий слой представлен текучими суглинками, где влажность составляет 42-90 %. Многолетнемерзлые грунты до глубины 5 м представлены суглинками тугопластичными и текучими, их весовая влажность изменяется от 35 до 170 %. Под правым откосом насыпи и бермой на глубине 2,5-3 м встречается подземный лед мощностью до 1,8 м. Температура грунтов на глубине 10 м в естественных маревых условиях равна -3,4°C, что определяется охлаждающим влиянием напочвенного покрова. Мощность активного слоя на мари равна 1,02 м, в лесу – 0,85 м.

Участок ПК 6934 находится на нижней части склона восточной экспозиции с относительно большим уклоном. Поперечный профиль организован осенью 2007 г. и охватывает лес, просеку, земляное полотно высотой до 8 м, просеку и лес. Мохово-брусничный покров мощностью 0,1-0,15 м характеризуется повышенной влажностью (42-62 %). Здесь грунты активного слоя, представленные мягкопластичными суглинками, имеют влажность 24-29 %. Многолетнемерзлые грунты представлены мягкопластичными и текучими суглинками, влажность которых изменяется в широких пределах от 27 до 132 %. Подземный лед и ледогрунт мощностью 2,3-3,5 м залегают на глубине 1,2-2,1 м. Температура грунтов на глубине 10 м колеблется от -2,4 до -2,8°C. Мощность активного слоя в лесу составляет 0,76-0,88 м.

В районе пикетов 6926 и 6934 грунты основания под высокими (7-8 м) насыпями стали охлаждаться с первого года отсыпки и отмечено поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород уже к концу теплого сезона 2009 г. на 1 м. Это объясняется тем, что начало отсыпки приходилось в конце холодного сезона. В последующие годы это тенденция сохранилась и в 2017 г. верхняя граница мерзлоты находилась в теле насыпи (рис. 2 и 3). По температурным данным глубина сезонного протаивания в теле насыпи достигает 4,5-5,5 м, т.е. за десять лет верхняя кромка мерзлоты могла приподняться на 3,5-4,5 м по оси насыпи от уровня первоначального естественного залегания. Здесь следует отметить, что межгодовые колебания амплитуды температуры грунтов основания по оси насыпи на глубине 1,5 м составляет всего 0,3°C, под более затененным правым нижним откосом наибольшая (10,4°C) и под более открытым левым нижним откосом наименьшая (3,0°C) (рис. 3). Многолетнемерзлые грунты основания под этими насыпями находятся в устойчивое состояние.

Участок ПК 6932 представляет склон восточной экспозиции занятый мохово-брусничным лиственничным лесом. Поперечный профиль оборудован в осенью 2007 г. после вырубki леса и охватывает лес, просеку, земляное полотно высотой 2-3 м с установкой на бермах СОУ и укладкой на основании бермы и насыпи теплоизоляционного материала из пеноплекса, просеку и лес. В лесу мохово-брусничный напочвенный покров мощностью до 0,1 м характеризуется повышенной влажностью (38-49 %). Средняя влажность активного слоя, представленный мягкопластичными суглинками, составляет 30-31 %. Влажность многолетнемерзлых мягкопластичных и текучих суглинков варьирует в пределах 39-73 %. По всему профилю на глубине 1,7-3,5 м встречается подземный лед мощностью до 6,5 м и ледогрунт мощностью до 2 м. Температура грунтов на глубине 10 м в лесу равна -2,2°C. Мощность активного слоя изменяется от 0,72 до 0,82 м. Здесь применения вертикальных парожидкостных СОУ на бермах в сочетании теплоизоляционным материалом из пеноплекса в основании земляного полотна привело к стабильному охлаждению грунтов его основания (рис. 4) и поднятию верхней кровли многолетнемерзлых пород (см. рис. 2), что обеспечивает устойчивость грунтов оснований земляного полотна. Здесь следует отметить, что возведение насыпи производилось в зиму 2009 г.

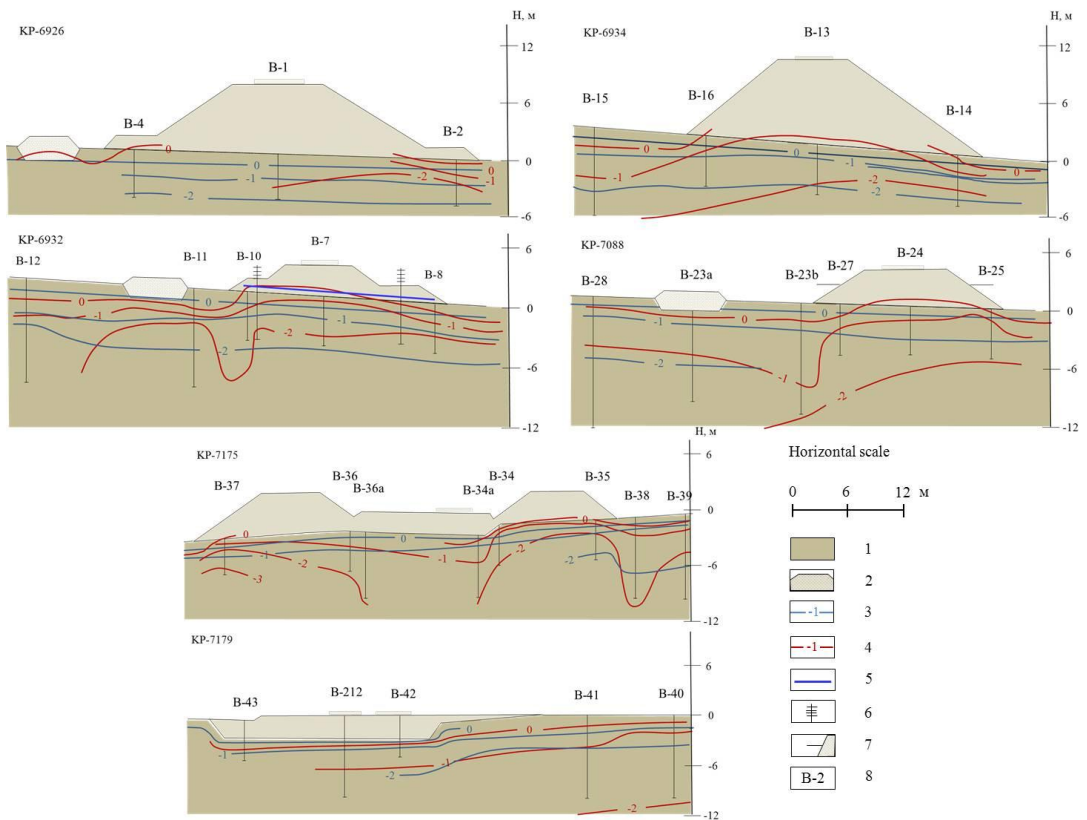


Рис. 2. Трансформация мерзлотных условий грунтов основания земляного полотна железной дороги различных конструкций и прилегающей территории

- 1 – грунты основания земляного полотна и прилегающей территории; 2 – скальный грунт с заполнителем до 10 %; термоизоуплеты грунтов (нулевая изотерма представляет верхнюю границу ММП);
- 3 – до отсыпки земляного полотна в сентябре 2007 г., 4 – после отсыпки в 1 сентября 2017 г.; 5 – теплоизолирующий слой термоплекса; 6 – сезонно охлаждающее устройство (СОУ); 7 – солнцезащитный и снегоудерживающий навес; 8 – термометрическая скважина и ее номер

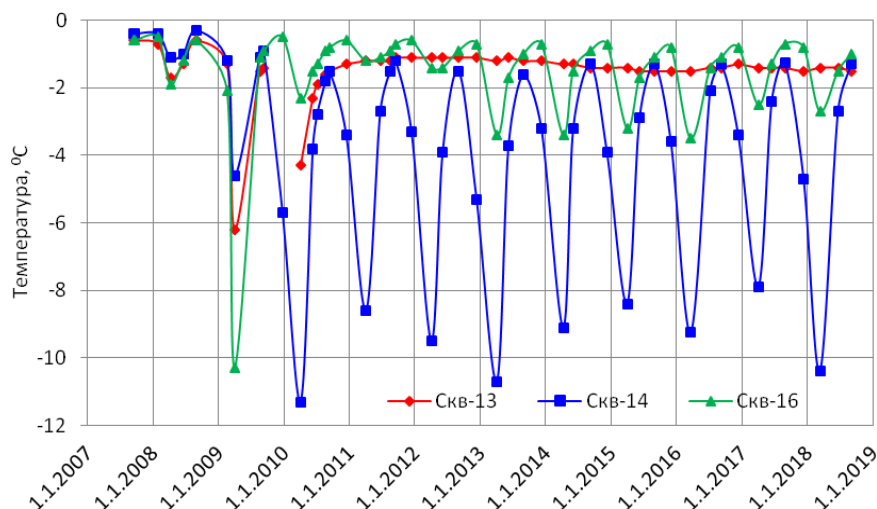


Рис. 3. Динамика температуры грунтов основания на глубине 1,5 м под высокими 7-ми метровыми насыпями (ПК 6934) под основаниями левого (С-16) и правого (С-14) откосов и под оси насыпи (С-13)

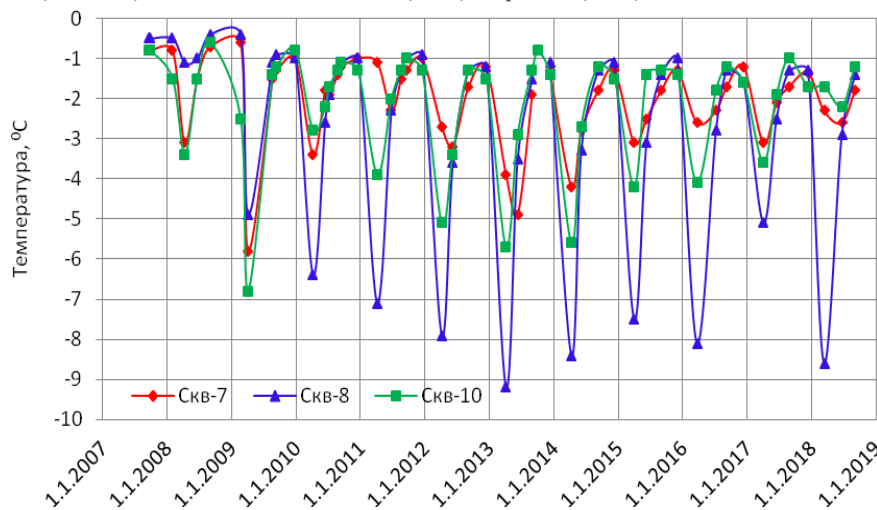


Рис. 4. Динамика температуры грунтов основания на глубине 1,5 м низких 3-метровых насыпей (ПК 6932) с применением СОУ в сочетании теплоизоляционным материалом из пеноплекса на правой (С-8) и левой (С-10) бермах, под оси насыпи (С-7)

В районе ПК 7088 поперечный профиль оборудован в конце августа 2008 г. и проложен на водоразделе межлеса мохово-брусничном лиственничнике и включает лес, просеку, земляное полотно высотой 2,5-3,0 м с консольным солнцезащитным и снегоудерживающим навесом на откосах насыпи, просеку и лес. Мохово-брусничный покров мощностью 0,05-0,1 м сильно увлажнен (90-274 %). Активный супесчаный слой находится в твердом, пластичном и текучем состоянии и средняя влажность слоя изменяется от 28 до 42 %. В основании земляного полотна многолетнемерзлые грунты представлены супесями и суглинками текучими, влажность которых достигает до 52 %. Под ними встречается ледогрунт мощностью 1,0-1,8 м. Слева от земляного полотна на глубине 2,3-3,0 м встречается подземный лед мощностью 5,0-8,0 м. Температура грунтов в лесу на глубинах 5, 10 и 20 м соответственно составляет минус 1,9, 2,5 и 2,8°C. Мощность активного слоя в лесу изменяется в пределах 0,78-1,05 м. Конструкции консольных солнцезащитных навесов на середине откоса насыпи первую зиму после возведения не оказали должного охлаждающего эффекта на грунты основания земляного полотна под навесом. Это объясняется увеличением мощности сезоннопротаивающего слоя и повышением среднегодовой температуры грунтов на просеках вдоль земляного полотна до отсыпки

насыпи, и которые привели к позднему смыканию сезоннототаивающего слоя и малому накоплению холода. В последующие зимы под навесом, из-за быстрого промерзания сезонноталого слоя, отмечен заметный охлаждающий эффект навесов на грунты основания земляного полотна. Под оси насыпи заметное охлаждение грунтов основания земляного полотна происходило в третью зиму. В настоящее время продолжается тенденция охлаждения грунтов основания насыпей (рис. 5). Здесь слева между насыпью и валиком отмечено деградация мерзлоты, вследствие увеличения мощности СТС и повышения температуры грунтов (см. рис. 2).

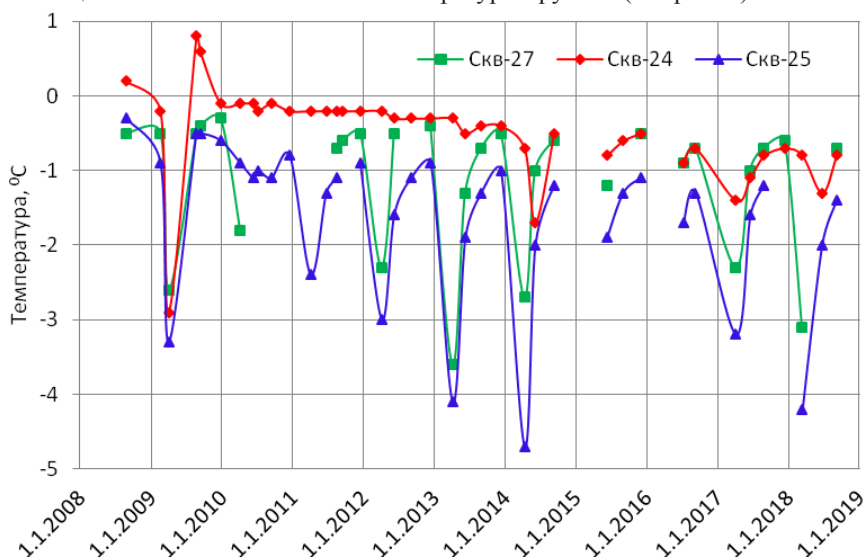


Рис. 5. Динамика температуры грунтов основания на глубине 1,5 м на низких 3-метровых насыпях с применением конструкций консольных снегоудерживающих и солнцезащитных деревянных навесов (ПК 7088): под осью (С-24), под основанием правого (С-25) и левого (С-27) откосов

Участок ПК 7175 представляет склон межжалсыя западной экспозиции занятый мохово-брусничным лиственничным лесом. Поперечный профиль был оборудован в августе 2008 г. до отсыпки насыпи и охватывает лес, просеку, земляное полотно со сложной конструкцией с высокими боковыми бермами, просеку, лес. В лесу мохово-брусничный напочвенный покров мощностью до 0,1 м достаточно увлажнен (32-53 %). Средняя влажность активного суглинистого слоя составляет 23-24 %, многолетнемерзлого суглинка – 32-116 %. Подземные льды вскрыты с глубины 2,3 м и имеют мощность более 6 м. Температура грунтов в лесу на глубине 10 м составляет -2,0°C. Мощность активного слоя в лесу изменяется в пределах 0,83-0,95 м.

На участке ПК 7175 в начале теплого сезона 2009 г. была начата возведения насыпи с частичным удалением грунтов активного слоя и заменой их скальными породами. К концу лета грунты основания насыпи до глубины 1 м были тальми, а на глубинах 3 и 5 м температуры, по сравнению с осенью 2008 г. почти не изменились. В зимний сезон 2009/2010 гг. здесь была сооружена насыпь до проектного уровня со сложной конструкцией с высокими боковыми бермами (см. рис. 2). 23 августа 2010 г. пробурена скважина В-34а, по данным которой верхняя граница многолетнемерзлых пород находилась на глубине 3 м от поверхности насыпи. В конце теплого сезона 2011 г. по температурным данным этой скважины эта граница опустилась ещё на 1,5 м. В период 2011-2017 гг. верхняя граница многолетней мерзлоты колебалась на глубине в пределах 4,3-4,8 м (рис. 6). В 2011 г. отмечено существенное понижение температуры грунтов основания высокой (5 м) левой бермы, незначительное понижение температуры зафиксировано под невысокой (3 м) правой бермой. В 2012 г. под правой бермой верхняя кровля многолетней мерзлоты приподнята до уровня естественной поверхности, а под левой бермой верхняя граница мерзлых грунтов отмечена уже в теле высокой бермы. Итак, по состоянию 2017 г., грунты основания под высокими бермами имеют тенденцию к охлаждению, а под насыпью – к повышению (см. рис. 2).

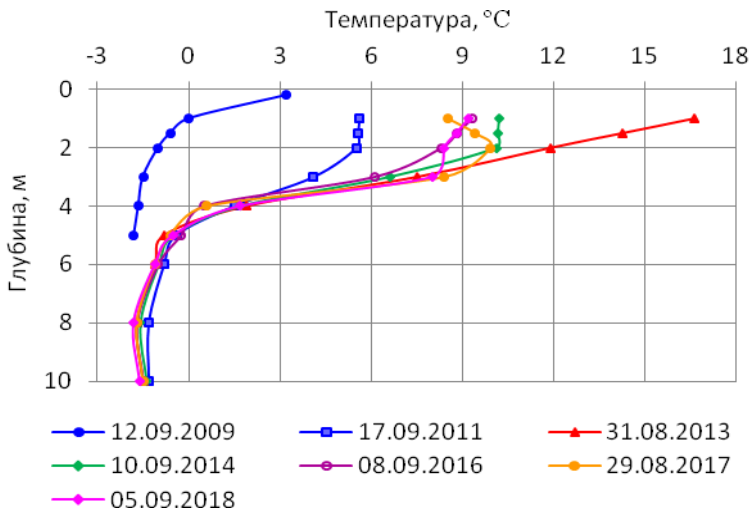


Рис. 6. Изменение температуры грунтов по глубине в теле насыпи (мощностью до 2,8 м) и грунтов основания земляного полотна железной дороги в районе ПК 7175

Участок ПК 7179 представляет ровную поверхность межальсы занятый мохово-брусничным лиственничным лесом. В поперечном профиле бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после возведения земляного полотна. При бурении скважин глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5-3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Напочвенный мохово-брусничный покров на просеке и в лесу характеризуется средней увлажненностью (20-30 %). Под осью земляного полотна на глубине 3,8 м встречается подземный лед мощностью до 1 м. В лиственничном лесу температура грунтов на глубине 10 м составляла -2,0°C. Мощность активного слоя под пологом леса составляла 0,73-0,85 м. Здесь сооружена нулевая насыпь с удалением грунтов сезоннотраивающего слоя и заменой его скальными грунтами. Уже с первого года сооружения насыпи выявлено формирование многолетней чаши протаивания, угрожающая устойчивости земляного полотна (см. рис. 2). В настоящее время этот процесс продолжается. Глубина протаивания достигла более 4 м (рис. 7а). Температура грунтов основания земляного полотна имеет тенденцию к повышению (рис. 7б).

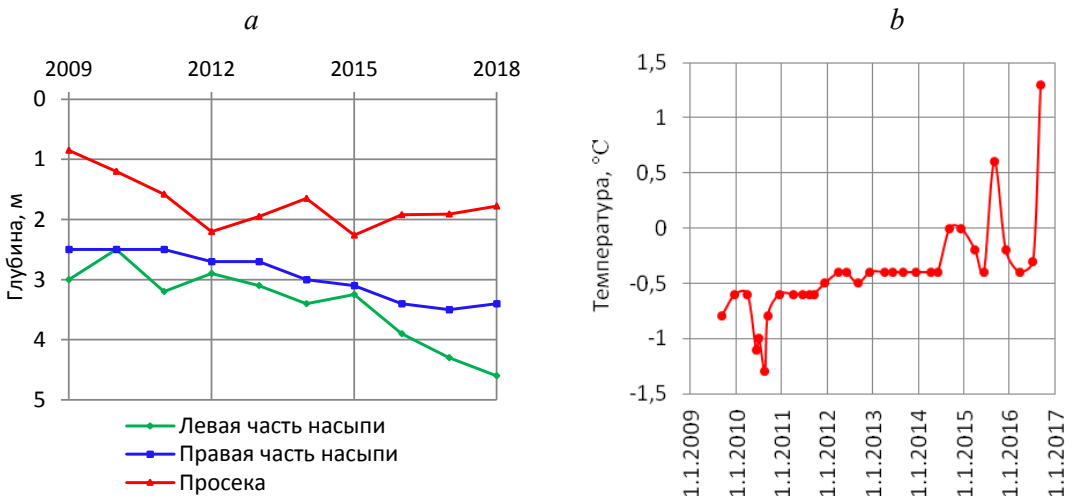


Рис. 7. Динамика глубины сезонного протаивания грунтов на просеке и грунтов основания (а) и температуры грунтов основания на глубине 3 м (б) нулевой насыпи в районе ПК 7179

В период временной эксплуатации железной дороги наблюдается деградация мерзлых пород ледового комплекса на откосах и днищах выемок. Слабым местом выемок, проложенных по сильнольдистым и сильнопросадочным категориям грунтов, являются откосы их в местах контакта подстилаемых льдистых грунтов со скальными грунтами, особенно в его верхней части. Выемки по мерзлотно-грунтовым условиям можно подразделить на 3 группы: слабо-, средне- и сильнодеформируемые. Слабodeформируемые выемки приурочены к участкам с песчаными грунтами II и III категорий просадочности, среднедеформируемые выемки характерны на супесчаных и суглинистых грунтах III-IV категорий просадочности и сильнодеформируемые выемки встречаются на супесчаных и суглинистых грунтах IV-V категорий просадочности с повторно-жильными льдами. На участке распространения пород ледового комплекса выемки и нулевые насыпи занимают около 14 % трассы.

В районе ПК 6924 температурный режим грунтов после строительства земляного полотна железной дороги на участке выемки резко изменился в сторону потепления. На левом борте откоса выемки температура грунтов имеет тенденцию к повышению, на валике, наоборот, к понижению. Сравнение температурных данных в период изысканий в 2005 г. (С-281/05) и в период временной эксплуатации дороги в 2016 г. показало, что температура грунтов левого борта откоса выемки на глубинах 2,5; 5 и 10 м за это время повысилась соответственно на 5,6; 1,9 и 1,4°C, слева на валике на 1,6; 1,5 и 1,2°C (рис. 8). В 2016 г. по температурным данным мощность сезонноталого слоя в лесу составила 0,8 м, на валике – 2,4 м и на левом борте откоса выемки – 3,8 м, что свидетельствует о деградации многолетней мерзлоты на прилегающем участке выемки.

В районе ПК 7002 в 2011 г. была пробурена скважина на дне выемки. Здесь мощность каменной отсыпки составляет 2 м. Температура грунтов на глубине 10 м была равной -1,2°C. В 2012, 2013 и 2014 гг. по температурным данным мощность сезонного протаивания соответственно составила 2,2, 3,3 и 3,3 м. Температуры на глубинах 5 и 10 м были соответственно: в 2012 г.: -1,0 и -1,1°C; в 2013 г.: -0,5 и -1,0°C; в 2014 г.: -0,4 и -1,0°C. В 2006 г. по данным изысканий на этом участке (ПК 7002, С-4/06) в естественных условиях в лесу на этих глубинах температуры грунтов соответствовали -2,4 и -2,1°C. Итак, за 8-летний период под выемкой температура многолетнемерзлых пород на глубинах 5 и 10 м повысилась на 2,0 и 1,4°C (см. рис. 8).

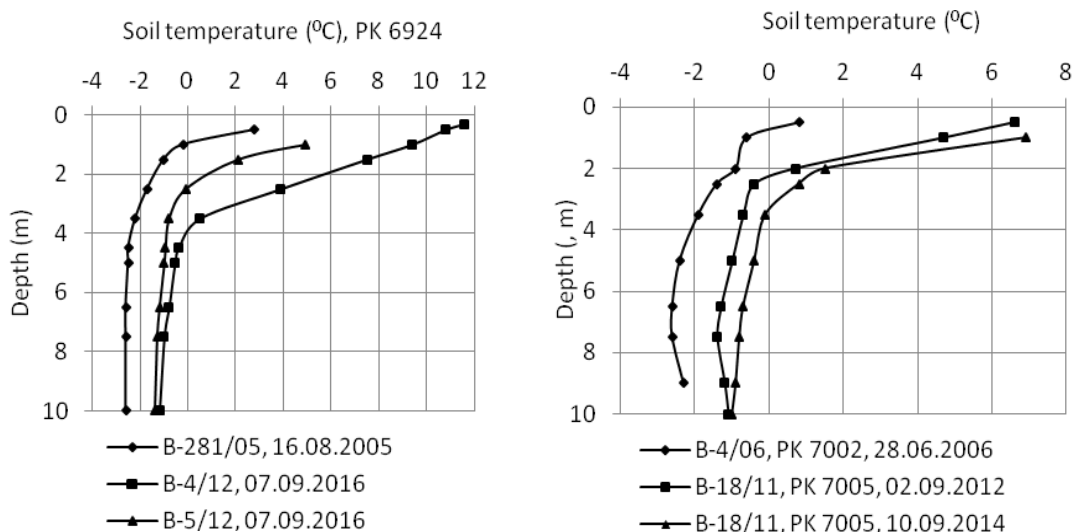


Рис. 8. Изменение температуры грунтов по глубине в естественных условиях (СВ-281/05; С-4/06), у борта выемки (С-4/12), на валике (С-5/12) и на дне выемки в районе ПК: 6924, 7002, 7005

Таким образом, в период временной эксплуатации железной дороги наблюдается деградация мерзлых пород ледового комплекса на откосах и днищах выемок (рис. 9).

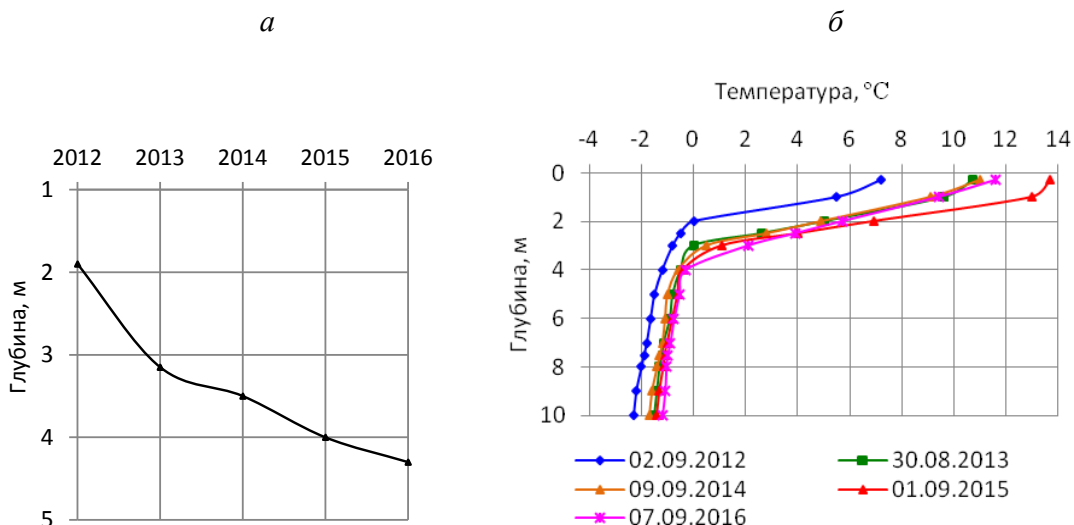


Рис. 9. Динамика глубины протаивания грунтов основания на дне выемки в районе ПК 7005+50 (а) и изменение температуры грунтов по глубине на борту откоса выемки ПК 6924 (б)

Заклучение

1. На основе инженерно-геокриологического мониторинга за период 2009-2017 гг. на участке развития пород ледового комплекса выявлены закономерности динамики теплового состояния грунтов в системе железнодорожное полотно – окружающая среда.

2. На прилегающей к земляному полотну территории после возведение насыпи в связи с изменением микроклиматических условий наблюдается увеличение межгодовой изменчивости мощности снежного покрова. В связи с увеличением освещенности местности и нарушением теплообмена поверхности с атмосферой отмечено значительное увеличение мощности СТС на просеках, в меньшей мере – в лесу у просек. В лесных, маревых комплексах и на просеках повышение температуры грунтов на глубине 10 м составляет 0,5-0,7°С.

3. Количественно оценена динамика теплового состояния грунтов основания и тела земляного полотна железной дороги при широком применении сезонно-охлаждающих устройств, теплоизоляционных материалов, снегоудерживающих и солнцезащитных навесов. Установлено поднятие верхней кровли многолетнемерзлых пород и охлаждения грунтов основания под высокими насыпями, низкими насыпями при совместном применении СОУ и теплоизоляционных материалов, и при использовании снегоудерживающих и солнцезащитных навесов. Выявлено формирование многолетней чаши протаивания при отсыпке нулевой насыпи с удалением сезонно-талого слоя в её основании. Отмечена деградация мерзлых пород ледового комплекса на откосах и днищах выемок.

Литература

1. Варламов С.П. Лыдность 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, 29-31 мая, 2006 г.). – Тюмень, 2006. – Т. 2. – С. 212-214.
2. Позин В.А. «Ледовый комплекс» Центральной Якутии как опытный полигон железнодорожного строительства в экстремальных инженерно-геокриологических условиях / В.А. Позин, А.А. Королев, М.С. Наумов // Инженерная геология. – 2009. – № 1. – С. 12-18.
3. Изыскания, проектирование и строительство автомобильных дорог в районах распространения вечной мерзлоты (ВСН 84-89). – М.: Министерство транспортного строительства СССР, 1990. – 271 с.
4. Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот-Кердем на участке «ледового комплекса» // Материалы семинара-совещания (Якутск, 11-12 сент. 2007 г.). – Якутск, 2007. – 165 с.

5. 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, 7-8 дек. 2005 г.). – М., 2005. – 118 с.
6. Варламов С.П. *Натурные исследования температурного режима грунтов основания насыпей на участке развития ледового комплекса // Современные проблемы теплофизики и теплоэнергетики в условиях Крайнего Севера: материалы X научно-технической конференции памяти профессора Н.С. Иванова* (7 декабря 2011 г., г. Якутск). – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2013. – С. 33-46.
7. Варламов С.П. *Тепловое состояние грунтов выемок железной дороги Томмот – Нижний Бестях на участке развития ледового комплекса // Современные проблемы теплофизики и теплоэнергетики в условиях Крайнего Севера: материалы XI науч.-тех. конф., посвящ. памяти д.т.н., проф. Н.С. Иванова* (Якутск, 7 декабря 2013 г.) [электронное издание]. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2016. – С. 90-98.
8. Варламов С.П. *Трансформация мерзлотных компонентов экосистем под влиянием природно-технических систем / С.П. Варламов, П.Н. Скрябин // Успехи современного естествознания.* – 2012. – № 11 – С. 74-76.
9. Варламов С.П., Скрябин П.Н., Шендер Н.И. *О тепловом состоянии оснований насыпей железной дороги Томмот – Кердем на участке распространения пород ледового комплекса // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума, 3-7 сентября 2011 г., г. Мирный.* – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, 2011. – С. 204-209.
10. Stepan Varlamov. *Temperature study of railway embankments on ice-rich permafrost in Yakutia // Journal of Engineering of Heilongjiang University. Special Edition of the 10th International Symposium on Permafrost Engineering, 2014, vol. 5, No 3, pp. 90-99.*

References

1. Varlamov S.P. *L'distost' gruntov severnogo uchastka proektiruemoj zheleznoj dorogi Tommot-Kerdem (st. Olen' – st. Kerdem) // Teoriya i praktika ocenki sostoyaniya kriosfery Zemli i prognoz ee izmeneniya: Materialy Mezhdunarodnoj konferencii* (Tyumen', 29-31 maya, 2006 g.). – Tyumen', 2006. – Т. 2. – С. 212-214.
2. Pozin V.A. *«Ledovyy kompleks» Central'noj YAkutii kak opytnyj poligon zheleznodorozhnogo stroitel'stva v ehkstremaal'nyh inzhenerno-geokriologicheskikh usloviyakh / V.A. Pozin, A.A. Korolev, M.S. Naumov // Inzhenernaya geologiya.* – 2009. – № 1. – С. 12-18.
3. *Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo avtomobil'nyh dorog v rajonah rasprostraneniya vechnoj merzloty (VSN 84-89).* – М.: Министерство транспортного строительства СССР, 1990. – 271 с.
4. *Obespechenie nadezhnosti stroyashchihsya sooruzhenij zheleznodorozhnoj linii Tommot-Kerdem na uchastke «ledovogo kompleksa» // Materialy seminar-soveshchaniya* (Yakutsk, 11-12 sent. 2007 g.). – Yakutsk, 2007. – 165 s.
5. *Proektirovanie i stroitel'stvo zemlyanogo polotna zheleznoj dorogi Tommot-Kerdem v slozhnykh inzhenerno-geokriologicheskikh usloviyakh. Itogi inzhenernykh izyskanij v 2005 g. // Materialy nauchno-tekhnicheskogo soveta* (Yakutsk, 7-8 dek. 2005 g.). – М., 2005. – 118 s.
6. Varlamov S.P. *Naturnye issledovaniya temperaturnogo rezhima gruntov osnovaniya nasypej na uchastke razvitiya ledovogo kompleksa // Sovremennye problemy teplofiziki i teploehnergetiki v usloviyakh Krajnego Severa: materialy H nauchno-tekhnicheskoy konferencii pamyati professora N.S. Ivanova* (7 dekabrya 2011 g., g. Yakutsk). – Yakutsk: Izdatel'skij dom SVFU, 2013. – С. 33-46.
7. Varlamov S.P. *Teplovoe sostoyanie gruntov vyemok zheleznoj dorogi Tommot – Nizhnij Bestyah na uchastke razvitiya ledovogo kompleksa // Sovremennye problemy teplofiziki i teploehnergetiki v usloviyakh Krajnego Severa: materialy HI nauch.-tekh. konf., posvyashch. pamyati d.t.n., prof. N.S. Ivanova* (Yakutsk, 7 dekabrya 2013 g.) [ehlektronnoe izdanie]. – Yakutsk: Izdatel'skij dom SVFU, 2016. – С. 90-98.
8. Varlamov S.P. *Transformaciya merzlotnykh komponentov ehkosistem pod vliyaniem prirodno-tekhnicheskikh sistem / S.P. Varlamov, P.N. Skryabin // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya.* – 2012. – № 11 – С. 74-76.
9. Varlamov S.P., Skryabin P.N., Shender N.I. *O teplovom sostoyanii osnovanij nasypej zheleznoj dorogi Tommot – Kerdem na uchastke rasprostraneniya porod ledovogo kompleksa // Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma, 3-7 sentyabrya 2011 g., g. Mirnyj.* – Yakutsk: Izd-vo Instituta merzlotovedeniya im. P.I.Mel'nikova SO RAN, 2011. – С. 204-209.
10. Stepan Varlamov. *Temperature study of railway embankments on ice-rich permafrost in Yakutia // Journal of Engineering of Heilongjiang University. Special Edition of the 10th International Symposium on Permafrost Engineering, 2014, vol. 5, No 3, pp. 90-99.*