

## Опыт проектирования и строительства на участке «Ледовый комплекс» Амуро-Якутской железнодорожной магистрали

Д.М. Шестернев, А.В. Литовко, А.А. Чжан

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск  
shesdm@mail.ru

**Аннотация.** Обоснованы актуальность, научная и практическая значимость решаемых задач, кратко охарактеризованы особенности геокриологических условий участка работ, рассмотрены методика полевых и лабораторных исследований, необходимость применения на участках ледового комплекса инновационного проектирования, обеспечивающего эффективность управленческих и технических решений по регулированию температурного режима земляного полотна (насыпи) и оснований железной дороги АЯМ. Прогноз кинетики температурного режима грунтов основания во времени на участке инновационного проектирования с использованием термоизоляционных материалов выполнен с применением математического моделирования. Полученные результаты не противостоят результатам инженерно-геокриологического мониторинга. Показано, что управленческие решения, обеспечивающие заданные эксплуатационные параметры функционирования железной дороги АЯМ на участке «Ледовый комплекс» и на других ее участках, должны базироваться на совместной оценке (экономической и технической) эффективности используемых инновационных материалов и технологий, из которых изготавливаются стабилизационные системы и их комплексы.

Ключевые слова: Ледовый комплекс, многолетнемерзлые грунты, Амуро-Якутская магистраль (АЯМ), земляное полотно, индивидуальное проектирование, температура грунта, математическое моделирование, экономическая оценка.

## Individual Experience of Design and Construction at the Site «Ice complex» of Amur-Yakutsk Railway

D.M. Shesternev, A.V. Litovko, A.A. Chzhan

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk  
shesdm@mail.ru

**Abstract.** The relevance, scientific and practical significance of the tasks being solved are substantiated in the article. The features of the geocryological conditions of the site are briefly described. The technique of field and laboratory studies is considered. The necessity of applying innovative design on the areas of «Ice Complex» is substantiated, ensuring the effectiveness of managerial and technical solutions for regulating the temperature regime of the roadbed (embankment) and the bases of the AYAM railway. The forecast of the kinetics of the temperature regime of the foundation soils in time on the site of innovative design using thermal insulating materials is performed using mathematical modeling. The obtained results do not contradict the results of engineering-geocryological monitoring. It is shown that the management decisions that provide the specified operational parameters for the functioning of the AYAM railway at the «Ice Complex» site and on its other sites should be based on a joint assessment (economic and technical) of the performance of the innovative materials and technologies.

Key words: Ice Complex, permafrost, Amur-Yakutsk railway (AYAM), roadbed, custom design, soil temperature, mathematical modeling, economic evaluation.

---

ШЕСТЕРНЕВ Дмитрий Михайлович – д.т.н., проф., зав. лаб.; ЛИТОВКО Андрей Владимирович – н.с.; ЧЖАН Андрей Антонович – инженер.

### Введение

Эффективность эксплуатации Амуро-Якутской железнодорожной магистрали Берка-Кит–Томмот–Якутск (АЯМ) определяется многими факторами, из которых основными являются геокриологические условия: распространение многолетнемерзлых пород, их температура, мощность, льдистость, механические и теплофизические свойства, кинетика и механика криогенных процессов и явлений. Наиболее сложными геокриологическими условиями характеризуется участок АЯМ км 670 – км 750, где льдистость грунтов оснований достигает 50–60 %. При проведении инженерно-геологических изысканий он получил название «Ледовый комплекс» [2]. Строительство АЯМ на этом участке было выполнено по специально разработанному проекту. Этот проект предусматривал использование инновационных технологий для сохранения грунтов оснований в мерзлом состоянии при эксплуатации АЯМ (Принцип 1). Наблюдения за изменением температуры грунтов на участке «Ледовый комплекс» были организованы ИМЗ СО РАН в соответствии с программой мониторинга, предусмотренного в Госконтракте с Правительством РС (Я) [3, 6], и продолжаются по настоящее время.

На первом этапе (2007–2010 гг.) мониторинговые исследования изменений геокриологических условий выполнялись по отдельным программам, предусматривающим:

а) контроль состояния земляного полотна (лаборатория инженерной геокриологии, научный руководитель, д.т.н. Р.В. Чжан);

б) контроль температурного режима трассы АЯМ (лаборатория геотеплофизики и прогноза, научный руководитель, к.г.-м.н. Н.И. Шендер).

В 2011 г. эти программы были объединены в рамках Госконтракта № 1090 и в дальнейшем работы выполнялись под научным руководством д.т.н. Д.М. Шестернева.

Результаты длительных мониторинговых исследований и эффективность управления температурным режимом грунтов оснований АЯМ с использованием термоизоляторов нашли отражение в данной статье.

### Методика исследований и способы управления температурным режимом грунтов основания

Трасса АЯМ пересекает Ледовый комплекс Абалахской надпойменной террасы р. Лены (км 703 – км 747). Его мощность достигает 25 м, ниже до глубины 50 м он подстилается аллювиальными, при оттаивании маловлажными и влажными песками. На момент инженерно-геологических изысканий температура грунтов

на глубине годовых колебаний изменялась в пределах от  $-0,5$  до  $-4,0$  °С. На территории Ледового комплекса многолетнемерзлые породы (ММП) характеризовались сплошным распространением по площади. Максимальная глубина сезонного оттаивания грунтов достигала 2,0–2,5 м. В слое грунтов с 2–3 до 10 м льдистость отложений изменялась от 0,2 до 0,8 д. ед. [2]. В связи с этим при строительстве АЯМ были произведены выемки сильно- и очень сильнольдистых грунтов. Устойчивость откосов обеспечивалась с использованием преимущественно термоизоляторов, каменной наброски и солнцезащитных навесов. На участках распространения льдистых и сильнольдистых грунтов (III–IV категории просадочности) в комплекс мероприятий, обеспечивающих предотвращение деградации ММП в основании земляного полотна, входили: 1) вертикальные парожидкостные сезонные охлаждающие устройства (СОУ) в сочетании с теплоизолятором – пенополистиролом на 39 участках (км 693 – км 710, км 730) общей протяженностью 4,9 км; 2) тепловая изоляция из экструдированного пенополистирола толщиной 5 см на откосах и бермах (км 709, протяженность 129 м); 3) устройство консольных солнцезащитных навесов на откосах (км 709, протяженность 100 м); 4) устройство СОУ (км 709, протяженность 100 м) и др. Кроме того, на участке распространения пород ледового комплекса при возведении земляного полотна широко использовался теплоизоляционный материал из пеноплекса, перекрытого геосеткой или георешеткой, поверхность которых засыпалась супесчаными грунтами мощностью до 15 см. Всего было использовано 10 разновидностей проектных решений [5]. Все проектные решения были применены при строительстве на опытном участке «Ледовый комплекс», в пределах которого геокриологические условия и строительные свойства грунтов оснований АЯМ отличались значительным разнообразием. Для контроля и диагностики причин изменений температуры грунтов оснований на опытном полигоне были оборудованы термометрические пункты. Их глубина изменялась в пределах 10–15 м. Точность наблюдений составляла  $\pm 0,1$  °С. Частота измерений была не менее 4 раз в год. Общий период наблюдений составил более 10 лет и на сохранившихся термометрических пунктах после строительства АЯМ продолжается и в настоящее время. Изменения мощности слоя сезонного оттаивания грунтов контролировались с использованием горных выработок и геофизических методов. Ежегодно проводились наблюдения за развитием криогенных процессов для оценки их влия-

ния на состояние откосов насыпей и выемок на участках применения инновационных технологий проектирования и за их пределами. По результатам исследований составлялись графические модели кинетики температурного поля основания грунтов железной дороги [7,8].

### Результаты исследований и их анализ

Анализ результатов 10-летних мониторинговых исследований показал, что небольшая группа инновационных мероприятий, используемых при строительстве с учетом специальных проектных решений, не обеспечивает необходимый и достаточный температурный режим грунтов, предусмотренный проектом для их сохранения в мерзлом состоянии, другая, более многочисленная – отвечает поставленным задачам.

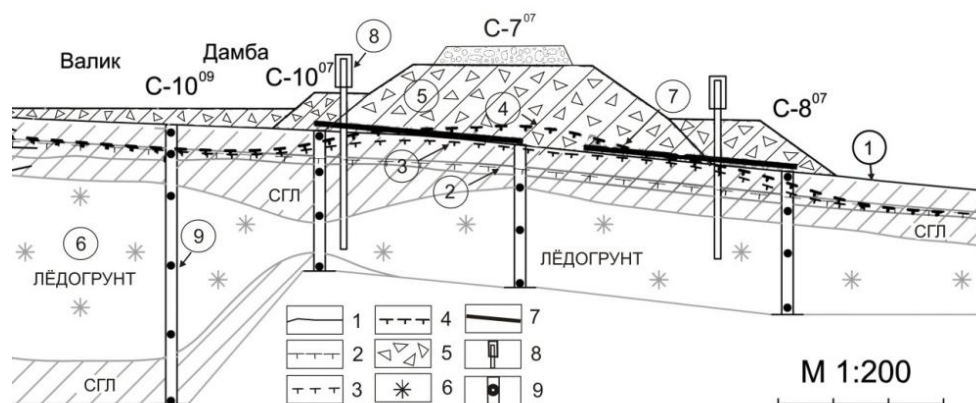
В первую группу входят практически все инновационные технологии, базирующиеся на использовании солнцезащитных навесов и пенополистирольных теплоизоляторов, расположенных на подошве земляного полотна или на поверхности откосов выемок.

Конструкция используемых навесов на участке АЯМ «Ледовый комплекс» способствует накоплению снега под ними и над ними. Это обуславливает увеличение отепляющего воздействия на грунты откосов выемок и на грунты оснований земляного полотна сооружения. Кроме того, используемые конструктивные решения не обеспечивают долговечность эксплуатации навесов. После третьего года установки навесов зафиксировано ежегодное 2–3 % разрушение от их общей длины, которое отрицательно влияет на тепловой режим мерзлых грунтов и использование в качестве теплоизоля-

тора пенополистирольных плит, расположенных на подошве земляного полотна и берм. На этих участках температура грунтов оснований не понижается, а повышается. Объясняется это тем, что пенополистирольные плиты, являясь мощным термическим сопротивлением и находясь на подошве берм или земляного полотна мощностью меньше мощности слоя сезонного промерзания, обеспечивают большую потерю тепла грунтов оснований в летний по сравнению с поступлением в него в зимний период.

Во вторую группу входят вертикальные парожидкостные термосифоны – СОУ, установленные на бермах насыпи (ПК 6933); теплоизоляция откосов насыпи и берм толщиной 5 см (ПК 7083); сочетание теплоизоляционного материала, уложенного в основание бермы и СОУ (ПК 7089) и др. Для примера рассмотрим участок АЯМ «Ледовый комплекс» в районе ПК 6932, где для обеспечения функционирования основания по Принципу I применялся комплекс мероприятий, перечисленных выше [5].

Грунты в верхней части разреза основания земляного полотна в районе ПК 6932 сложены суглинками льдистыми и сильнольдистыми мощностью от 2–3 до 5 м. При оттаивании грунты текучие. Относительное значение осадок при их оттаивании достигает 0,12 д. ед. и более, что позволяет их отнести к сильнопросадочным и чрезмерно просадочным разновидностям. Ниже залегает слой лёдогрунта мощностью до 5–6 м, чрезмерно просадочного при оттаивании. На этом участке выемка грунтов не производилась. Для сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии было принято решение использовать мероприятия по управлению их температурой (рис. 1).



**Рис. 1.** Управление кинетикой верхней границы многолетнемерзлых грунтов оснований земляного полотна АЯМ (ПК 6932): 1 – почвенно-растительный слой; 2 – подошва слоя сезонного талого слоя до строительства (23.09.2007 г.); 3 – верхняя граница ММП при завершении строительства (17.09.2011 г.); 4 – верхняя граница ММП на начало эксплуатации АЯМ (30.08.2013 г.); 5 – земляное полотно (древянный грунт с суглинистым заполнителем); 6 – лёдогрунт; 7 – теплоизолятор «пеноплекс»; 8 – сезонные охлаждающие установки; 9 – термометрическая скважина; СГЛ – суглинок льдистый

Комплекс мероприятий:

- для исключения отепляющего воздействия поверхностных вод и минимизирования обводненности берм и земляного полотна, следовательно, и развития гидротермических деформаций (пучения при промерзании и осадок при оттаивании грунтов) в нагорной части использовались водоотжимная берма и валик;

- для снижения отепляющего воздействия на мерзлые грунты основания земляного полотна в подошве земляного полотна, под каждым из его откосов и частью берм были уложены термоизоляторы из пеноплекса, теплопроводность которого равна  $0,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , что снижало поступление тепла в ММП в летний период;

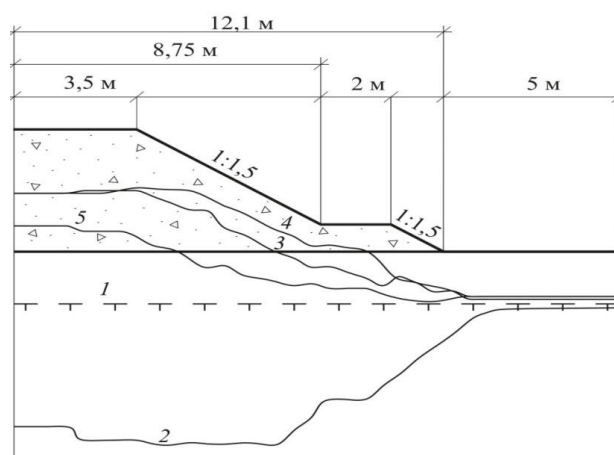
- в бермах, на глубину не менее чем на 5 м от их подошвы, были установлены СОУ на расстоянии 3 м друг от друга (экспериментально установленный радиус охлаждения СОУ равен 1,5 м).

Результаты мониторинговых исследований показали, что комплекс перечисленных выше мероприятий, реализованный при строительстве АЯМ на участке «Ледовый комплекс», обеспечивает устойчивость оснований земляного полотна. Это следует из того, что кровля многолетнемерзлых пород существенно поднялась и находится в нижней части земляного полотна, следовательно, задача по эксплуатации АЯМ по Принципу I на данном его участке успешно решена.

Полученные результаты подтверждают также ранее выполненный Е.С. Ашпизом прогноз о том, что при комплексном использовании теплоизоляции и берм температура грунтов основания восстановится через 10 лет до значений, существовавших до строительства [1]. В то же время глобальное изменение климата может существенно замедлить этот процесс. Для проверки этой гипотезы нами было выполнено математическое моделирование с целью оценки времени выхода в квазистационарный режим природно-технической системы АЯМ «Ледовый комплекс». Моделирование выполнялось на программном обеспечении, разработанном на кафедре геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова [4]. В качестве опытного участка был выбран профиль насыпи в районе ПК 7083 (рис. 2).

Параметры природных условий для моделирования приняты в соответствии с результатами геокриологического мониторинга, выполненного по программе Госконтракта №1090. Математическим моделированием было определено положение кровли ММП под телом насыпи после 50 лет ее эксплуатации [9]. Это позволило оценить работу ряда стабилизационных мероприятий. Как и следовало ожидать, при их от-

сутствии оттаивание ниже подошвы насыпи под серединой основной площадки составит 6,5 м, под серединой откоса – 9,7 м. Вследствие этого осадки под насыпью составят не менее 0,3 м, что вызовет деформацию железнодорожных путей. При этом стационарная температура грунтов на подошве насыпи под кромкой проезжей части ( $T_{st}$ ) составит  $1,6 \text{ °C}$ . Как показало проектирование с использованием инновационных материалов и технологий, можно предотвратить растепление грунтов основания, в том числе и с применением теплоизоляционных материалов. Это подтверждается и результатами выполненного математического моделирования (рис 2, кривая 1).



34

**Рис. 2.** Изменение положения кровли многолетнемерзлых грунтов (1) через 50 лет после строительства насыпи ж/д АЯМ (ПК 7083) по результатам математического моделирования при: 1 – границе слоя сезонного оттаивания и промерзания; 2 – каменной наброске; 3 – применении теплоизолятора (экструдированного пенополистирола); 4 – оборудовании термосифонов на берме

По результатам моделирования отмечается, что каменная наброска оказывает охлаждающий эффект, в результате которого кровля ММП поднимается в тело насыпи на 2 м выше подошвы под основной площадкой земляного полотна, а температура понижается до  $-2,33 \text{ °C}$ . Глубина сезонного оттаивания под серединой откоса в этом случае не превышает 1,9 м (рис. 2, кривая 2). Это весьма эффективное решение, однако оно годится только для малоснежных районов, поскольку при большом количестве снега происходит заполнение им порового пространства наброски и система выходит из строя. Также конвекция воздуха в насыпи может быть нарушена в результате кольматации пор грунта мелким комом.

Укладка теплоизоляционного материала с коэффициентом термического сопротивления  $1,43 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$  на откос насыпи и берму обеспечивает

формирование стационарной температуры  $T_{st} = -1,24$  °С и максимальное поднятие кровли ММГ в тело насыпи. Это свидетельствует об охлаждающем эффекте используемых теплоизоляционных материалов. Под основной площадкой происходит поднятие кровли ММГ на 2,2 м, при этом глубина сезонного оттаивания грунтов под серединой откоса составляет всего 1,3 м (рис. 2, кривая 3).

Установка на берме насыпи вертикальных парожидкостных термосифонов длиной 8,5 м и радиусом 0,035 м решает проблему растепления основания наилучшим образом из представленных мероприятий. В процессе моделирования методом подбора было определено оптимальное расстояние между замораживающими колонками, которое составляет 1,6 м, при этом  $T_{st} = -0,43$  °С. В результате работы термосифонов стабилизировалось положение верхней границы ММГ под основной площадкой на уровне 1 м выше подошвы насыпи, величина оттаивания под серединой откоса составила 3,4 м (таблица).

**Оценка использования мероприятий по стабилизации теплового состояния насыпей ж/д по результатам моделирования**

Мероприятие	$T_{st}$ , °С	Поднятие кровли ММГ в тело насыпи, м
Каменная наброска	-2,33	2,0
Укладка на откос теплоизоляции	-1,24	2,2
Термосифоны	-0,43	1,0

С учетом стоимости материалов, используемых для обеспечения эффективности эксплуатации ж/д АЯМ (10 п. м ж/д насыпи высотой 4,5 м), охлаждающие устройства, изготовленные из них, располагаются в следующий возрастающий ряд (руб.): теплоизоляция (24288) – термосифоны (59022) – каменная наброска (118300). Для того, чтобы говорить о точной количественной оценке того или иного мероприятия для управления температурным режимом оснований АЯМ, необходимо иметь данные по затратам на перевозку материала, его укладку или установку в тело насыпи. К сожалению, такими данными мы не располагаем. Однако можно с уверенностью утверждать, что при одинаковом расстоянии от места производства материала до места его укладки в тело насыпи наименьшей стоимости будет отвечать теплоизоляция, что определяется ее незначительным весом. Ей будут соответствовать наименьшее число тонно-километров при перевозке и наименьшие трудозатраты при монтаже на откосе насыпи. Поэтому применение теплоизоляции в качестве охлаждающего устройства на железнодорожных магистралях в криолитозоне Якутии будет вероятно наиболее целесообразно [9].

ждающего устройства на железнодорожных магистралях в криолитозоне Якутии будет вероятно наиболее целесообразно [9].

### Заключение

Проведенными исследованиями установлено, что часть мероприятий, используемых при индивидуальном проектировании, не обеспечивает необходимый и достаточный температурный режим грунтов для их сохранения в мерзлом состоянии:

1. Установка СОУ и укладка пеноплекса вызывают заметное охлаждение грунтов в подгорной части. Теплоизолирующее влияние пеноплекса ослабевает с увеличением глубины укладки. Охлаждающий эффект СОУ заметен на расстоянии до 0,5 м от тела насыпи, а на удалении 1,3 м резко снижается.

2. Консольные навесы на откосах насыпи высотой 2,5–3,0 м не оказали ожидаемого охлаждающего эффекта на грунты основания.

3. Применение мероприятий, предусмотренных проектированием с использованием инновационных материалов, при воздействии глобального изменения климата в современных границах приведет к стабилизации температуры грунтов в основании АЯМ в соответствии с ранее выполненным моделированием.

4. Стоимость материалов, используемых для обеспечения эффективности эксплуатации ж/д АЯМ и охлаждающих устройств, изготовленных из них, располагаются в следующий возрастающий ряд: теплоизоляция – термосифоны – каменная наброска.

5. В связи с глобальным изменением климата мониторинг изменения температуры грунтов на участке АЯМ «Ледовый комплекс» следует продолжить.

### Литература

1. *Аштиниз Е.С.* Научные принципы проектирования и методические рекомендации по строительству земляного полотна в зоне распространения «ледового комплекса» // Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот–Кердем на участке «ледового комплекса»: Материалы семинара-совещания, Якутск, 11–12 сентября 2007 г. М.: ОАО «Проекттрансстрой», 2007. С. 63–89.

2. *Байкова Л.А.* Инженерно-геокриологические условия «ледового комплекса» // Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот – Кердем на участке «ледового комплекса»: Материалы семинара-совещания, Якутск, 11–12 сентября 2007 г. М.: ООО «Центр Трансстройиздат», 2007. С. 23–38.

3. *Варламов С.П.* Инженерно-геокриологические условия территории распространения пород ледового комплекса на строящейся железнодорожной магистрали Томмот–Якутск // Проблемы инж. мерзлотоведения: Материалы VII Международного симпозиума, 21–23 ноября 2007. Чита, 2007. С. 29–34.

4. *Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Хрусталев Л.Н., Яковлев С.В.* Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами «WARM»: Свидетельство № 940281. М.: РосАПО, 1994.

5. *Позин В.А., Лукин И.П., Дедова Н.П.* Проектные решения по земляному полотну на участках «ледового комплекса» // Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот–Кердем на участке «ледового комплекса»: Материалы семинара-совещания, Якутск, 11–12 сентября 2007 г. М.: ОАО «Проекттрансстрой», 2007. С. 39–59.

6. *Шестернев Д.М.* Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (на примере железной

дороги Беркатит–Томмот–Якутск) // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума, Мирный, 3–7 сентября 2011 г. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. С. 252–260.

7. *Шестернев Д.М., Литовко А.В.* Геокриологические проблемы эксплуатации участка железной дороги АЯМ «Беркатит–Томмот» // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума, Мирный, 3–7 сентября 2011 г. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. С. 261–266.

8. *Shesternev D.M., Litovco A.V., Chzhan A.A.* Study on innovative technologies in constructions of the Amur-Yacutsk Mainlain // Journal of Engineering of Heilongjiang Universiti. Harbin, China, 2014. V. 5, № 3. P. 133–137.

9. *Чжан А.А.* Оценка мероприятий по стабилизации мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи // Материалы Пятой конференции геокриологов России, Москва, 14–17 июня 2016 г. М.: Университетская книга, 2016. Т.1. С. 221–228.

*Поступила в редакцию 25.02.2017*