



Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне



Владимир ШАПРАН



Зульфия ФАЗИЛОВА

*Шапран Владимир Владимирович – ОАО «РЖД», Санкт-Петербург, Россия.
Фазилова Зульфия Тельмановна – Российский университет транспорта, Москва, Россия*.*

В перспективе до 2025 года на полигоне Северной железной дороги прогнозируется увеличение объёмов работы на 28,4 %, что связано со строительством Северного широтного хода. При этом значительная часть Северной железной дороги характеризуется сложными природно-климатическими условиями: вечной мерзлотой, полигонально-жильными льдами, заторфованностью территорий, резкими перепадами температур, значительными объёмами осадков в виде снега. В условиях планируемого роста грузонапряжённости диагностика земляного полотна в зоне распространения грунтов со слабой несущей способностью на фоне глобального изменения климата носит ключевой характер.

Статья посвящена вопросам обследования земляного полотна, расположенного в криолитозоне. Результаты диагностики состояния железнодорожного пути позволяют прогнозировать состояние объектов железнодорожной инфраструктуры, производить категорирование

просадок земляного полотна по степени опасности и разрабатывать мероприятия по его стабилизации.

Целью работы является изучение факторов, влияющих на процессы деградации земляного полотна, расположенного в криолитозоне.

Методы работы основаны на натурных исследованиях «больных» мест земляного полотна и статистических формах анализа продольных профильных деформаций (просадок) пути.

Результатом проведённой работы является исследование влияния ряда факторов, на развитие деформаций земляного полотна, расположенного в криолитозоне. В дальнейшем планируется на основе результатов диагностики состояния железнодорожного пути производить прогнозирование многолетнемёрзлого состояния объектов железнодорожной инфраструктуры, производить категорирование просадок земляного полотна по степени опасности и разрабатывать мероприятия по его стабилизации.

Ключевые слова: железная дорога, криолитозона, моренный рельеф, термокарст, сезонное протаивание грунтов, суффозия грунтов, профильные неровности, радарограмма, равноупругость пути.

*Информация об авторах:

Шапран Владимир Владимирович – инженер 1-й категории информационно-аналитического отдела Санкт-Петербургского центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры – Октябрьской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Октябрьской железной дороги – филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги», Санкт-Петербург, Россия, shaprandi@gmail.com.

Фазилова Зульфия Тельмановна – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортного строительства Российского университета транспорта, Москва, Россия, fazil_1905@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 12.11.2019, принята к публикации 21.02.2020.

For the English text of the article please see p. 92.

В перспективе до 2025 года на полигоне Северной железной дороги прогнозируется увеличение объёмов грузоперевозок на 28,4 %. При этом наибольшее увеличение перевозок ожидается на участках с теплотягой – 165,5 % к имеющимся на сегодняшний день объёмам, что связано со строительством Северного широтного хода (рис. 1). В условиях планируемого роста грузонапряжённости диагностика земляного полотна в зоне распространения грунтов со слабой несущей способностью на фоне глобального изменения климата носит ключевой характер.

Воркутинский промышленный район расположен на окраине вечномёрзлого массива Евразии и относится к области распространения вечномёрзлых грунтов.

В результате воздействия различных факторов как природного, так и техногенного характера при эксплуатации линейных сооружений (земляного полотна), возникают продольные профильные деформации (просадки) пути, которые способствуют дополнительному развитию продольных и поперечных сил, воздействующих как на ходовую часть подвижного состава, так и на железнодорожный путь [1–5].

Целью работы является изучение факторов, влияющих на процессы деградации земляного полотна, расположенного в криолитозоне.

Методы работы основаны на натуральных обследованиях «больных» мест земляного полотна и статистических формах анализа

продольных профильных деформаций (просадок) пути.

На настоящий момент значительное внимание уделяется техническому состоянию земляного полотна, качеству проводимых натурных осмотров и анализу итогов работы диагностических средств.

Однако, несмотря на множество статистических форм анализа, каждое место деформаций уникально по набору и степени влияния различных факторов, которые условно можно разделить на явные и неявные.

Так, при проведении натурных обследований мест продольных профильных деформаций в качестве явных факторов принято считать: обводнение основания земляного полотна по причине отсутствия стока поверхностных вод, завышенная крутизна откосов земляного полотна и отсутствие его обочины, прохождение участков, имеющих переменную жёсткость (например, подходы к мостам).

К неявным факторам можно отнести:

- особенности рельефа местности, его складчатость, экспозицию и крутизну склонов, поперечный уклон местности, наличие несквозных таликов;
- равноупругость пути (различная мощность щебёночного, старого щебёночного, асбестового и песчаного балластов, образовавшаяся при проведении ремонтов и выправочных работ);
- наличие скоплений поверхностных вод, расположенных в верховой части насыпи, возведённой на косогоре (суффозия грунтов тела насыпи);



Рис. 1. Схема развития Северного широтного хода и увеличения поездной нагрузки (из доклада первого заместителя начальника Северной железной дороги на тему «Технология работы локомотивов и локомотивных бригад, развитие инфраструктуры локомотивного комплекса в условиях развития Северного широтного хода и подходов к портам Северо-Западного бассейна», г. Ярославль 31.08.2018 г.).



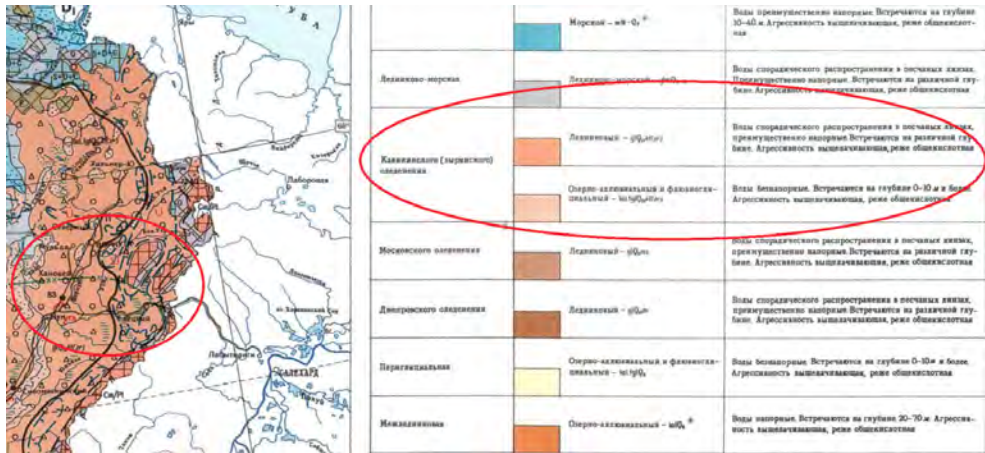


Рис. 2. Фрагмент схематической инженерно-геологической карты Воркутинского района Республики Коми (Схематическая инженерно-геологическая карта Коми АССР и Ненецкого национального округа Архангельской области, автор З. М. Дзениш, Министерство геологии СССР, Ухтинское территориальное геологическое управление, 1966 год).

- нарушение мохового и торфяного покровов и, как следствие, ранимость «мёрзлых» грунтов;
- влажность грунтов, застои воды в различных понижениях рельефа, в том числе в канавах для отвода воды при наличии в них перемычек;
- отепляющее воздействие снежного покрова в различных частных случаях.

Прежде чем рассмотреть влияние неявных факторов на деформативность земляного полотна железнодорожного пути, обратим внимание на геологическую историю севера территории Республики Коми.

Рассматриваемые горные породы относятся к формации Зырянского оледенения (далее – ЗО) [6–8]. Отложения области ЗО представлены широко развитыми ледниковыми образованиями (моренами), а также водно-ледниковыми (песками, гравием) и озёрно-ледниковыми (глинами, песками) отложениями, объединёнными в Зырянский надгоризонт верхнего плейстоцена четвертичной системы. Зырянские морены сложены суглинками, содержащими большое количество валунов. В них встречаются осадки с морской микрофауной, захваченные льдом с шельфа Карского моря и прибрежной суши. Мощность морен 30–50 м. В ледниковых отложениях позднезырянского оледенения сохранился реликтовый погребённый лёд.

В приледниковой области ЗО распространены аллювиально-озёрные и озёрные (подпрудные) тонкослоистые ленточные

глины, супеси, пески с растительными остатками.

Гидрогеологическая характеристика воды: для ледникового комплекса – спорадического (единичного, отдельного) распространения в песчаных линзах, преимущественно напорные, встречаются на различной глубине, агрессивность выщелачивающая, режа обще кислотная; для озёрно-аллювиального – воды безнапорные, встречаются на глубине 0–10 м и более, агрессивность выщелачивающая, режа – обще кислотная [6; 9].

Для области ЗО характерен моренный рельеф (холмисто-грядовый, холмисто-западинный), а также рельеф друмлинов, представляющий собой вытянутые холмы, состоящие из материала отложенной морены, имеющие размеры 900–2000 м в длину, 180–460 м в ширину и 15–45 м в высоту (рис. 3).

Влияние рельефа. Железнодорожный путь исходя из условий минимальных объёмов земляных работ, как правило, проходит вдоль пойменных участков рек.

Так, на рис. 3 представлен участок железнодорожного пути направления Коноша–Воркута. Преимущественный уклон местности в сторону пойменной части реки Воркута, где путь проходит по её древним высоким террасам. В соответствии с существующими нормами проектирования водопропускных сооружений, водопропускная труба (на рассматриваемом участке) отсутствует, однако в ре-

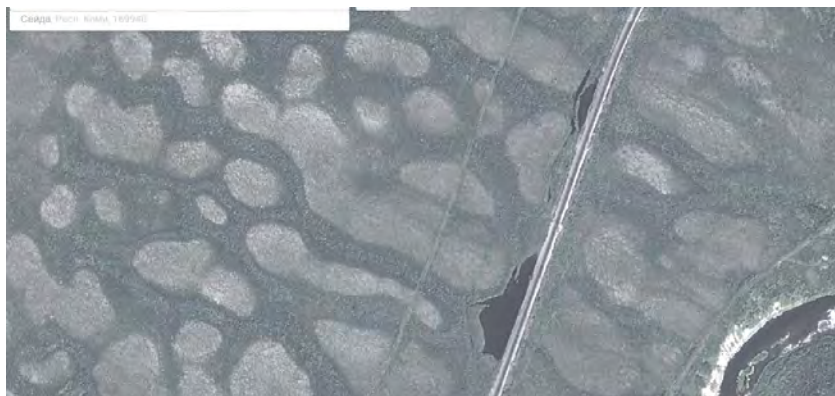


Рис. 3. Участок железнодорожного пути, проходящий по друмлинному рельефу (спутниковая фотосъёмка <https://www.google.ru/maps/>).

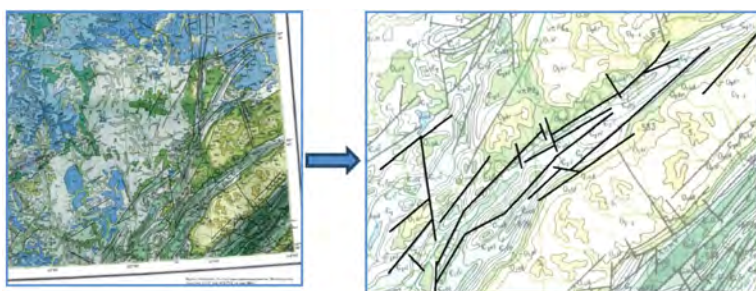


Рис. 4. Фрагмент государственной геологической карты и слой «Линеаменты» в ГИС (ресурс сети Интернет «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» <http://www.geokarta.ru/>).

зультате стока воды, скапливающийся в местах складок друмлинного (частично полигонального) рельефа и развития термокарста, образуются озёра, непосредственно примыкающие к телу насыпи. В результате происходит переувлажнение грунтов основания земляного полотна. При наличии значительного поперечного уклона местности происходит медленная фильтрация воды через тело насыпи (сопровождаяемая суффозией грунтов).

Однако не всегда в подобных местах объёмы стока воды достаточны для образования озёр, в большинстве случаев при пересечении железнодорожного пути ложбинами, где земляное полотно представлено высокими насыпями 6–12 и более метров, не происходит визуального различимого скопления воды. Описываемые неровности местности, как правило, сильно зарастают низкорослой растительностью (ёрником), что оказывает отепляющее влияние на состояние «мёрзлых» пород в данных местах (условно назовём их «линеоменты», рис. 4).

В сочетании со значительной мощностью четвертичных отложений, которые в рассматриваемом районе могут достигать 100 метров, наблюдается развитие несквозных таликов, как следствие, в основании тела высоких насыпей грунты находятся как в талом, так и крайне переувлажнённом состоянии. Это было наглядно подтверждено при обустройстве мест пересечений пути и газопровода в 2010–2011 гг., когда в зимний период у основания насыпи был вскрыт водный горизонт. Значительная часть продольных профильных деформаций, расположенных в рассматриваемом районе, проходит по подобным участкам рельефа.

Равноупругость пути. В ходе эксплуатации железнодорожного пути в местах постоянных деформаций производятся работы по его механизированным выправкам. В результате длительной эксплуатации и многочисленных «подъёмов» верхняя часть насыпи имеет слоистую структуру, которая снизу вверх представлена: основными грунтами тела насыпи, далее слой старого песчано-гравийного балласта, ста-



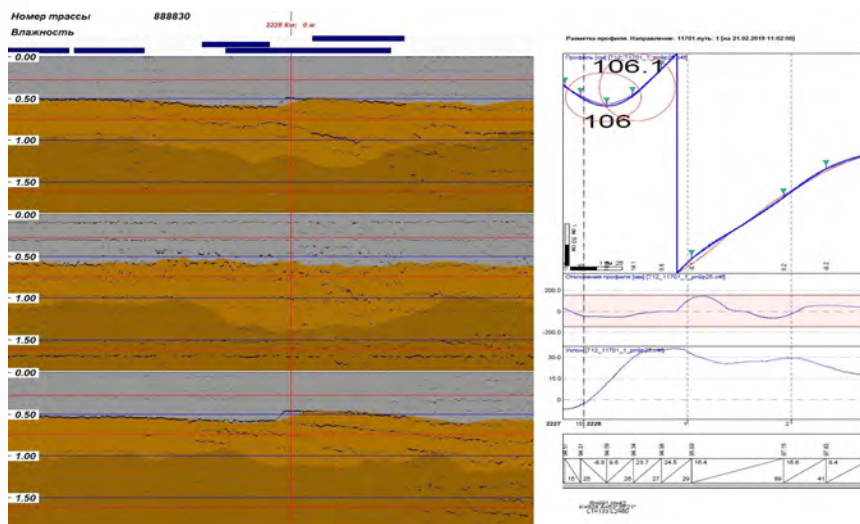


Рис. 5. Радарограмма грунтов, совмещённая с разметкой продольного профиля пути (фронт капитального ремонта 2009 года).

рого асбестового балласта и верхней части слоем чистого балласта. При равномерном срезе бульдозером верхнего слоя загрязнённого щебня (в ходе капитального ремонта пути) обнажается прослойка старого уплотнённого асбеста (который тактильно можно сравнить с асфальтом). При механизированной выправке осадок (лощин) пути слоистая структура нарушается.

Современные путеобследовательские комплексы позволяют производить георадарное зондирование и профилирование деформативных мест земляного полотна. Методики интерпретации данных георадарного профилирования и малоглубинной сейсмотомографии, разработанные в ДВГУПС [2–3], позволяют получить многослойную модель глубинного разреза земляного полотна и основания с непрерывным распределением прочностных и деформационных характеристик грунтов [12], выделенными зонами неоднородностей как в поперечных профилях, так и в объёмной постановке.

На рис. 5 представлена радарограмма грунтов (данные ДКС Интеграл) [13], совмещённая с разметкой продольного профиля участка пути (фронт капитального ремонта 2009 года). В левой части рисунка (радиограмме) по оси пути и левой обочине наблюдается местное проникновение старого асбестового балласта в слой основных грунтов тела насыпи. Синие полосы в верхней части георадарного зондирова-

ния указывают на переувлажнённое состояние грунтов. Залегание грунтов в поперечной плоскости неравномерно. На правой части рис. 5 данный участок представлен разметкой продольного профиля (данные ЦНИИ-4) [14], где можно наблюдать продольную профильную деформацию пути протяжённостью 120 м и значением деформации 0,250 м.

К неявным факторам (способствующим возникновению продольных профильных деформаций насыпей, возведённых на косогоре) можно отнести наличие понижений, заполненных водой и расположенных в верхней части насыпи (суффозия грунтов тела насыпи). В связи с этим особое внимание при проведении натурных осмотров насыпи при её расположении на косогоре следует уделять наличию бассейнов водосбора, непосредственно примыкающих к её телу (рис. 6).

В результате образующегося водного рукава происходит суффозия грунтов (вынос мелких частиц грунта), которая может повлечь внезапные деформации земляного полотна, либо оседание одной или обеих рельсовых нитей различной интенсивности [9; 11]. Так, в июне прошлого года на 2195-м километре перегона Сейда–Чум наблюдалось интенсивное оседание правой рельсовой нити (рис. 7), что повлекло за собой ограничение скорости движения поездов: в первые сутки до 25 км/час, а в последующие трое суток – до 40 км/час.



Рис. 6. Данные видеокamеры вагона путеизмерителя ПСО67 (из архива данных Воркутинской дистанции пути Северной дирекции инфраструктуры, видеофайл обзорной камеры вагона-путеизмерителя ПСО67, июнь 2019 года).

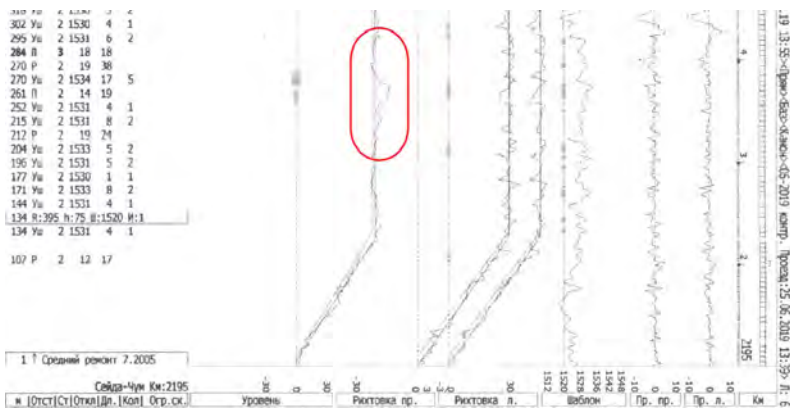


Рис. 7. Графическая диаграмма вагона путеизмерителя (из архива данных Воркутинской дистанции пути Северной дирекции инфраструктуры, графическая диаграмма вагона-путеизмерителя ПСО67, июнь 2019 года).

Влага. Коэффициент теплопроводности дисперсных пород возрастает с увеличением их влажности, поскольку теплопроводность воды и льда выше, чем воздуха. Таким образом, глубина промерзания-протаивания пород с увеличением влажности будет уменьшаться [8; 10]. Общая зависимость изменения глубины сезонного промерзания и оттаивания пород от их влажности представлена на рис. 8.

Начальная часть графика показывает некоторое увеличение глубины сезонного промерзания и протаивания с увеличением влажности от 0 до некоторой величины $W_{нз}$. В этом интервале влага не замерзает при отрицательной температуре, и породы остаются немерзлыми (охлаждёнными). С увеличением влажности свыше $W_{нз}$ воз-

растает доля фазовых переходов в общем теплообороте породы, и глубина их промерзания и протаивания уменьшается.

Важное значение в формировании мощности слоя сезонного промерзания (или протаивания) имеет *температурная сдвижка*, которая представляет собой разность температур между поверхностью горных пород и подошвой сезоннопромерзающего (протаивающего) слоя. Температурная сдвижка возникает за счёт увеличения теплопроводности пород при их переходе из талого в мёрзлое состояние; чем больше льдистость мёрзлой породы, тем больше различие коэффициентов теплопроводности. Это явление объясняется тем, что теплопроводность льда примерно в четыре раза выше теплопроводности воды. Отме-



Рис. 8. Изменение глубины сезонного промерзания и оттаивания в зависимости от влажности грунта [по 9, А. В. Бойцов].

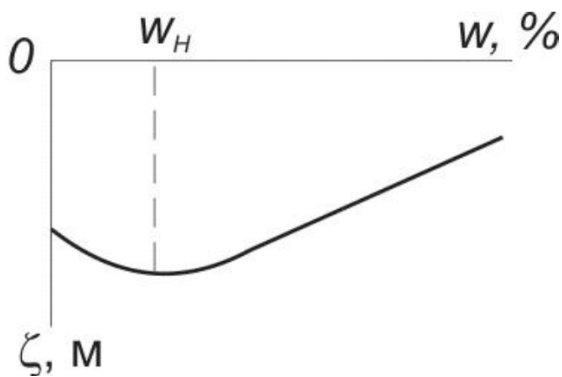
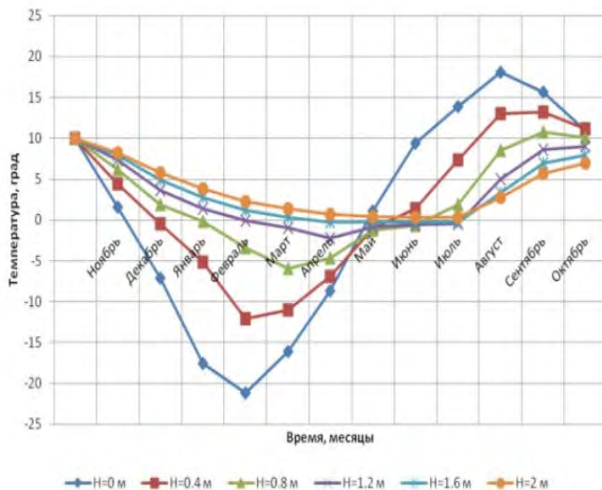


Рис. 9. Распределение температуры по месяцам на глубине $H_1 = 0$ м; $H_2 = 0,4$ м; $H_3 = 0,8$ м; $H_4 = 1,2$ м; $H_5 = 1,6$ м; $H_6 = 2,0$ м [по 10, С. А. Кудрявцев, А. В. Кажарский].



чено также, что чем дисперснее порода (при одинаковой влажности), тем коэффициент теплопроводности меньше и меньше соотношение λ_m/λ_t .

Понижение среднегодовой температуры пород на подошве слоя сезонного протаивания приводит к сокращению глубины сезонного протаивания пород, что подтверждается данными исследования Дальневосточного государственного университета путей сообщения [10], рис. 9.

На пологих дренируемых склонах и водоразделах, в зоне аэрации, сложенной песками мелкой и средней крупности, в начале интенсивного промерзания грунтов количество влаги близко к значению величины максимальной молекулярной влагоёмкости и не превышает 4–5 % от объёма породы. В летний сезон, особенно в период инфильтрации талых снеговых вод, влажность грунтов возрастает в 2–3 раза, в соответствии с этим резко увеличивается коэффициент теплопроводности при неизменной величине фазовых переходов. Это явление приводит, во-первых,

к быстрому протаиванию верхней части геологического разреза и, во-вторых, к формированию *положительной температурной сдвижки* на подошве деятельного слоя [7].

Количественная оценка деформаций пылеватого суглинка тугопластичной консистенции, связанных с морозным пучением и оттаиванием, приведённая в работе [10], показала, что за годичный цикл при уровне грунтовых вод от 1 до 2,5 м от дневной поверхности влажность увеличивается на 68 %, а сопротивление сдвигу глинистого грунта снижается в пять раз.

Мхи и торфяники. Трудно представить большеземельскую тундру без мхов, лишайников и торфяников. Однако их влияние на состояние «мёрзлых» грунтов недооценено. В ходе техногенного воздействия в полосе отвода железнодорожных земель (работа землеройной техники, вездеходные дороги) происходит нарушение растительного покрова. Работы по рекультивации в большинстве случаев не производятся, при разработке траншей различного назна-

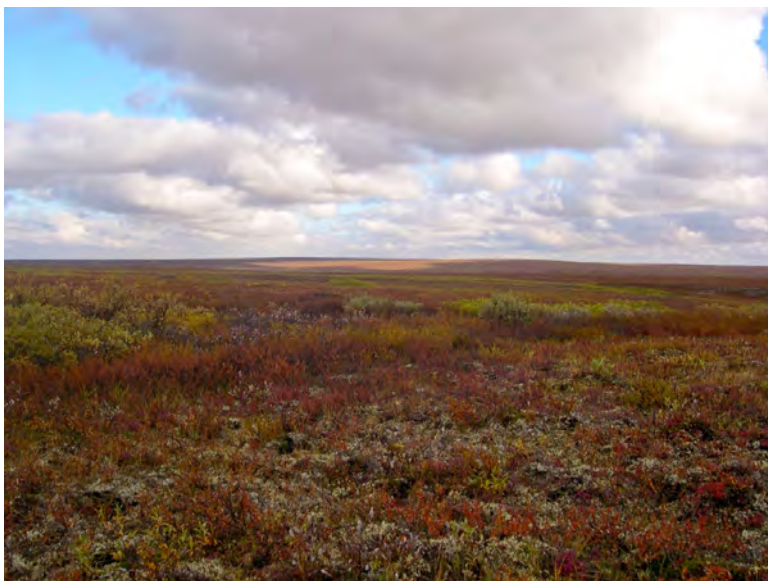


Рис. 10. Моховой покров большеземельской тундры (фото автора В. В. Шапран, 2018 год).

чения их укрепление и утепление их сечения не производятся.

Так мёрзлые толщи и растительность, развиваясь во времени, реагируют на изменение друг друга. Растительные сообщества во многих случаях являются хорошими индикаторами термического и влажностного состояния почвы, и это обстоятельство широко используется при мерзлотной съёмке. Часто уничтожение растительности приводит к повышению летних температур горных пород и глубины сезонного протаивания, что способствует усилению криогенных процессов, в первую очередь термокарста, термоэрозии и заболачиваемости. Нарушение теплового режима работы грунтов основания тела насыпи приводит к их деформациям.

Среди напочвенных покровов особенно высока охлаждающая роль влажных мхов (рис. 10). Дело в том, что в талом состоянии коэффициент теплопроводности мха в несколько раз меньше, чем мёрзлом. Следовательно, зимой под таким покровом грунты остывают достаточно интенсивно, а летом слабо прогреваются. Моховые покровы мощностью 15–20 см приводят к сокращению глубины сезонного протаивания в 2–3 раза по сравнению с оголённой поверхностью и снижению на несколько градусов среднегодовой температуры пород [6; 9].

Подобным образом ведёт себя торфяной покров. Коэффициент теплопровод-

ности торфа в талом состоянии, как правило, в два раза ниже, чем в мёрзлом. При определённом влажностном режиме торфяника различие теплопроводностей может отличаться в разы. Поэтому даже при среднегодовой положительной температуре на поверхности торфа подстилающие грунты могут находиться в мёрзлом состоянии [9].

Снег. Снежный покров формируется практически повсеместно в районах, где встречаются мёрзлые породы. Влияние его на радиационно-тепловой баланс поверхности весьма велико и многообразно. Прежде всего, снег увеличивает альбедо дневной поверхности, повышая её отражательную способность в несколько раз. Это приводит к уменьшению поглощения лучистой энергии и к понижению средних годовых температур пород. Кроме того, к существенному сокращению приходной части теплового баланса приводят затраты тепла на таяние снега и частичное испарение талых вод. Тающий снег в течение некоторого времени поддерживает на поверхности нулевую температуру, что препятствует прогреванию почвы, несмотря на положительную температуру воздуха. Отсюда следует охлаждающее влияние снежного покрова. В то же время снежный покров, обладающий малой теплопроводностью, как теплоизолятор, предохраняет почву от зимних теплопотерь и выступает



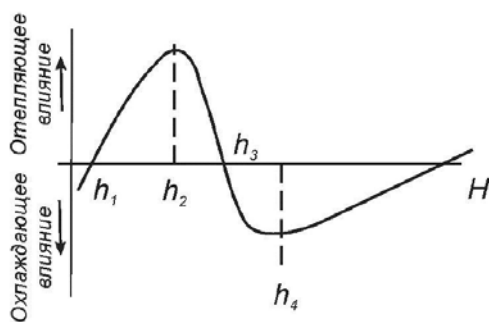


Рис. 11. Изменение влияния снежного покрова на температурный режим подстилающих пород в зависимости от его мощности [по 9, А. В. Бойцов].

как отепляющий фактор. Чем выше теплоизоляционные свойства снега в зимний период, тем больше его отепляющее влияние на почвогрунты. Таким образом, главными факторами, определяющими влияние снежного покрова на температурный режим поверхности, являются высокое альbedo и теплоизолирующая роль снега.

Исследование влияния снежного покрова на температурный режим подстилающих пород в зависимости от его мощности, результаты которого приведены на рис. 11, показало, что если снег имеет малую мощность (до h_1), то преобладает его роль как отражателя солнечных лучей, и такой мало-мощный покров оказывает охлаждающее воздействие на грунты. При увеличении мощности снежного покрова от h_1 до h_2 преобладает его отепляющее влияние. При дальнейшем росте мощности снега от h_2 до h_3 большое количество тепла расходуется на его таяние в весенний период, продолжающееся значительное время при положительной температуре воздуха. Поэтому отепляющая роль снежного покрова постепенно снижается, и, в конечном итоге, он становится охлаждающим фактором для горных пород (от h_3 до h_4), что максимально проявляется на участках, где снег не успевает стаять в тёплый период года. Дальнейшее накопление снега приводит к формированию многолетних снежников, температурный режим на подошве которых зависит от различных факторов природной среды, в том числе и от притока глубинного тепла [9; 11].

В целом для регионов, где развиты многолетнемерзлые толщи или наблюда-

ется устойчивое сезонное промерзание грунтов, снежный покров является отепляющим фактором. В области сезонного промерзания при снятии или отсутствии снежного покрова наблюдается значительное увеличение глубины зимнего промерзания горных пород. В области распространения многолетнемерзлых толщ при наличии сливающейся мерзлоты, уменьшение мощности снега ведёт, с одной стороны, к снижению среднегодовой температуры пород, а, следовательно, и некоторому снижению глубины протаивания, а с другой, к увеличению амплитуды колебаний температуры поверхности пород и, поэтому, — к увеличению этой глубины. Таким образом, снятие или отсутствие снежного покрова мало изменяет летние теплообороты в грунтах, которые в основном и определяют глубину их протаивания. По данным натурных наблюдений установлено, что увеличение мощности снежного покрова на 5–15 см приводит к повышению среднегодовой температуры пород на 1°C . Поэтому при достаточной мощности снежного покрова горные породы могут иметь положительную температуру в районах, где наблюдаются низкие среднегодовые температуры воздуха. Данная проблема наиболее актуальна для рассматриваемого региона, где постоянный мощный снежный покров наблюдается с октября по май. Земляное полотно представлено высокими насыпями, проходящими по открытым тундровым территориям, данное обстоятельство способствует скоплению значительных объёмов снега. В отдельных случаях насыпи полностью засыпаны снегом и образуются «снежные выемки» (рис. 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, можно сказать, что железнодорожный путь стал неотъемлемой частью экосистемы арктического края. Сама тундра представляет собой уникальную зону природы, для которой характерно наличие вечной мерзлоты, заливание почвы речными водами в период паводка и полное отсутствие древесной растительности, что создаёт определённые трудности при эксплуатации инфраструктурного комплекса.



Рис. 12. Разделка снежной выемки с использованием машины ФР3 (фото автора В. В. Шапран, 2015 год).

Анализ многочисленных факторов, влияющих на возникновение и развитие деформаций по земполотну, пролегающему в криолитозоне, показал, что каждое место деформации должно рассматриваться и изучаться индивидуально. Порой из множества выявленных факторов трудно определить ключевой, оказывающий максимальное влияние на развитие отступлений. Результаты анализов должны быть сведены в каталог для дальнейшего категорирования деформаций.

В дальнейшем планируется на основе результатов диагностики состояния железнодорожного пути производить прогнозирование многолетнемерзлого состояния объектов железнодорожной инфраструктуры, производить категорирование просядков земляного полотна по степени опасности и разрабатывать мероприятия по его стабилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Луцкий С. Я., Шепитько Т. В., Черкасов А. М. Технологический мониторинг сооружения земляного полотна на высокотемпературной мерзлоте. // Сб.: II Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах. Материалы симпозиума / Под ред. А. Л. Исакова и Ц. К. Лю. – 2015. – С. 41–48.
2. Стоянович Г. М., Пупатенко В. В., Сухобок Ю. А. Опыт комплексного геофизического обследования объектов железнодорожной инфраструктуры // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 1. – С. 282–287.
3. Пупатенко В. В., Паженцев Я. В. Комплексное обследование насыпей в Якутии // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 9. – С. 25–26.
4. Fazilova, Z. T., Shapran, V. V. Operation of civil and linear facilities of railway transport in Arctic zone. Proceedings of the 2018 International Conference «Quality

Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS2018, 2018, pp. 207–211.

5. Loktev, A., Fazilova, Z., Zaytsev, A., Borisova, N. Analytical modeling of the dynamic behavior of the railway track in areas of variable stiffness. Proc. TRANSOILCOLD. Series: Lecture Notes in Civil Eng. Ed A. Petriaev and A. Konon, Vol. 1, pp. 165–172.

6. Шполянская Н. А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики «глазами» подземных льдов. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 344 с.

7. Бабкин Е. М., Хомутов А. В., Дворников Ю. А., Хайруллин Р. Р., Бабкина Е. А. Изменение рельефа торфяника с вытаявающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. – 2018. – Т. 4. – С. 115–119.

8. Станиловская Ю. В., Мерзляков В. П., Сергеев Д. О., Хименков А. Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2014. – № 4. – С. 367–378.

9. Бойцов А. В. Геокриология и подземные воды криолитозоны: Учеб. пособие. – Тюмень, ТюмГНГУ, 2011. – 178 с.

10. Кудрявцев С. А., Кажарский А. В. Численное моделирование процесса морозного пучения и оттаивания в зависимости от скорости промерзания грунтов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 2. – С. 105–110.

11. Фазилова З. Т., Шапран В. В., Скворцов О. В. Профильные деформации земляного полотна в условиях вечной мерзлоты // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 22–24.

12. Roman, L. T., Tsarapov, M. N., Kotov, P. I., Volokhov, S. S., Motenko, R. G., Cherkasov, A. M., Shtein, A. I., Kostousov, A. N. Manual on the determination of physical and mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils (KDU, University Book), 2018, 188 p. DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-1-2-111>.

13. Архив данных Воркутинской дистанции пути Северной дирекции инфраструктуры.

14. Архив данных Воркутинской дистанции пути Северной дирекции инфраструктуры, выходные формы ДКИ Интеграл.

