

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.139

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_8

*А. Л. Ланис, Д. А. Усов, Е. И. Нагаев, В. Е. Пушкарев***ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «НАСЫПЬ – ОСНОВАНИЕ»
В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ЯНАО ***

Аннотация. Деградация многолетнемерзлых грунтов в Ямало-Ненецком автономном округе имеет негативный тренд на увеличение, что связано как с изменением климата, так и инженерно-хозяйственной деятельностью человека. В статье рассмотрен вопрос возникновения просадок основания земляного полотна линейной транспортной инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации с точки зрения установки взаимосвязи криогенных деформаций и характеристик грунтов. Разработана геотехническая модель системы «насыпь – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов в ЯНАО, позволяющая проектировать мероприятия по повышению эксплуатационной надежности, на основе терм стабилизации грунтов или противодеформационных сооружений. Для подтверждения возможности расчетов по разработанной геотехнической модели выполнена ее верификация путем сравнения качественной и количественной картины деформирования с результатами инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемого участка автомобильной дороги Надым – Салехард.

Ключевые слова: деградация многолетнемерзлых грунтов, криогенные деформации, многолетнемерзлые грунты, земляное полотно, геотехническая модель, транспортные сооружения.

Для цитирования: Геотехническая модель системы «насыпь – основание» в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов в ЯНАО / А. Л. Ланис, Д. А. Усов, Е. И. Нагаев, В. Е. Пушкарев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 8–18. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_8.

Введение

Практически вся территория Арктической зоны характеризуется сплошным или островным распространением многолетнемерзлых пород. За период с 1971 по 2020 г. наблюдается существенный рост температурного режима в регионе: среднегодовая температура повысилась на 3,5 °С, что составляет около 0,7 °С каждые десять лет. Такие изменения отражаются на состоянии окружающей среды и грунтовых условий. Например, сравнение годовых отклонений температуры от нормы за период с 1961 по 1990 г. и с 2008 по 2021 г. показывает увеличение разницы с 1,3 до 2,9 °С [1]. При этом глубина сезонного протаивания грунтов деятельного слоя выросла с 97 до 107 см, что свидетельствует о значительном влиянии потепления на кровлю многолетнемерзлых пород.

Потепление в Арктике происходит в два раза быстрее, чем в целом по планете, и приводит к уменьшению ледового покрова, деградации мерзлоты, изменению условий циркуляции атмосферы, увеличению осадков и погодным аномалиям [2]. Так, в связи с глобальным изменением климата и отчасти техногенным воздействием человека сложился негативный тренд на прогрессирующее деформаций сооружений на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) ввиду их деградации.

По оценкам международных исследований к концу XXI века деградация ММГ продолжит ускоряться, приповерхностный слой мерзлоты может потерять до 90 % своей площади из-за дальнейшего роста температур [3].

Одним из наиболее неблагоприятных последствий изменения климата в Арктической зоне являются просадки основания земляного полотна транспортных сооружений, связанные с проявлениями инженерно-геокриологических процессов [4, 5]. Методы управления такими деформациями до сих пор нельзя признать совершенными. Поэтому решение обозначенной выше проблемы имеет существенную научную значимость, заключающуюся в получении новых подходов, технологий, способов и кон-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20036, (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) и финансовой поддержки Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

трольно-диагностических методов для управления криогенными деформациями. Это должно позволить не только решить проблему адаптации объектов линейной транспортной инфраструктуры к изменениям климата и характеристик многолетнемерзлых пород в Арктической зоне Российской Федерации [6], но и получить методологическую основу, новые научные знания для решения других научных проблем.

Для установки связей и зависимостей между криогенными процессами и изменением физико-механических характеристик системы «насыпь – основание» в условиях ЯНАО необходимо разработать и верифицировать соответствующую геотехническую модель, что и является целью настоящей работы.

Теоретические основы, предпосылки, допущения

Авторами настоящей работы ранее выявлены особенности геокриологического состояния эксплуатируемого земляного полотна автомобильной дороги Надым – Салехард, в том числе протекающие в системе «насыпь – основание» криогенных процессов и сопутствующих им деформаций [7]. Выявлены последствия негативных криогенных процессов (деградации ММГ): продольная осевая трещина покрытия, просадки обочины, продольные трещины по кромке проезжей части и на откосах раскритием до 10 см, а также термокарстовые просадки в полосе отвода у подошвы земляного полотна, которые можно считать характерными для системы «насыпь – основание» в условиях деградации ММГ в ЯНАО [7]. На рис. 1 представлен геокриологический профиль характерного участка земляного полотна в соответствии с результатами исследований, приведенных в статье [7].

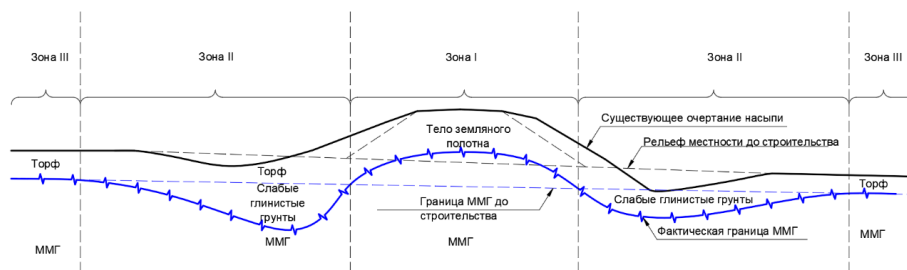


Рис. 1. Поперечный геокриологический профиль характерного участка земляного полотна [7]

Ранее выполненные авторами исследования позволили сформулировать следующие особенности геокриологического состояния характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи:

«...– грунты основания и тела земляного полотна под проезжей частью находятся в многолетнемерзлом состоянии;

– максимальная величина деградации ММГ произошла под откосными частями земляного полотна и в полосе отвода на достаточно большую ширину, что связано с нарушением естественных условий теплообмена за счет аккумуляции снега в холодный период года;

– после деградации ММГ формируются слабые водонасыщенные грунты, зоны термических просадок заполняются поверхностными водами;

– деформирование конструктивных элементов автомобильной дороги, в зависимости от зоны, происходит как за счет термических просадок (основание откосов и полоса отвода), так и за счет активных сдвиговых смещений грунтов деятельного слоя в откосных частях земляного полотна» [7].

Таким образом, для оценки влияния криогенных деформаций на эксплуатационные показатели линейных транспортных сооружений в условиях ЯНАО необходимо учитывать особенности физико-механических характеристик грунтов земляного полотна и основания, в том числе их состояние (талое, мерзлое и оттаивающее).

Известным фактом является различие в процессе осадки мерзлых грунтов при оттаивании и талых грунтов. Мерзлые грунты при оттаивании имеют запаздывание во времени деформаций, что связано с проявлением упруговязких и вязкопластичных свойств [8]. Для деформирования таких грунтов характерна стадия пластики во всей области изменения напряжений. Помимо этого, необходимо учитывать значительную сжимаемость и зависимость проницаемости от уплотнения.

Ю.К. Зарецким [8] введено понятие о трех зонах, образующихся, когда мерзлый грунт подвергается воздействию внешних сил и источника тепла. Так, в первой зоне температура грунта выше температуры фазовых переходов, во второй – грунт находится в пластичномерзлом состоянии, в третьей

– грунт находится в мерзлом состоянии. Такой подход учитывает работу грунтов основания сооружений с точки зрения их состояния, однако, для транспортных сооружений большое влияние оказывают геометрические параметры модели, что усложняет решение задачи описанным аналитическим методом.

Похожий подход к описанию оттаивания грунтов был представлен в статье [9]. Авторами была разработана одномерная модель для расчета осадки оттаивающих сезонно-мерзлых грунтов земляного полотна, которая представлена многослойной средой, состоящей из оттаявшего слоя (переменной мощности), слоя сезонно-мерзлого грунта и слоя грунта не попадающего в границы деятельного слоя.

Решение задачи деформирования железнодорожного земляного полотна на основе подхода, предложенного Ю. К. Зарецким, было описано в работах [10, 11] с применением метода конечных элементов (МКЭ). Была предложена трехслойная модель оттаивающего основания, состоящая из оттаявшего грунта, прослоя оттаивающего грунта и нижнего слоя мерзлого грунта. Границы между слоями переменны [11]. Так, применение МКЭ позволило учитывать геометрические параметры земляного полотна и сложное инженерно-геологическое строение с заданными характеристиками грунтовых элементов.

Необходимо отметить, что описанные выше подходы к решению сложившейся проблемы не в полной мере учитывают особенности геокриологического состояния эксплуатируемого земляного полотна характерного для условий ЯНАО, перечисленные ранее. В том числе необходимо учитывать, что грунтовая среда является многослойной, где каждый слой имеет свои физико-механические характеристики и поведение. Для выполнения качественных расчетов и получения адекватных результатов необходимо прежде всего верно выбрать модели поведения грунтов.

Так, в поперечном профиле на рассматриваемом участке автомобильной дороги Надым – Салехард можно выделить следующие слои:

- дорожная одежда, рекомендуемая модель поведения – линейно-упругая;
- земляное полотно автомобильной дороги (состояние талое, консолидация завершилась), рекомендуемая модель – упрочняющегося грунта. Такая модель дает хорошее соответствие опытным данным на всем диапазоне деформаций, поскольку эта модель, в отличие от модели Мора – Кулона, позволяет учесть пластическое деформирование грунта на стадии его допредельного состояния и учесть нелинейное поведение грунта. Эта модель включает: в качестве поверхности разрушения – формулировку Мора – Кулона; для описания упругой области напряженно-деформированного состояния – гиперболическую формулировку DuncanChang [12] с изменяемыми модулями упругости для траектории первичного нагружения и траектории разгружения – повторного нагружения; для описания пластических сдвиговых и объемных деформаций – две функции текучести для девиаторного и изотропного нагружений;

- сезоннооттаивающий грунт, представленный сильноразложившимся водонасыщенным торфом и глинистыми грунтами текучей консистенции (состояние талое, консолидация не завершилась), рекомендуемая модель – ползучести слабого грунта, построенная в рамках теории вязкопластичности грунта [13]. Такая модель используется для описания, зависящего от времени поведения слабых грунтов, таких как нормально уплотненные глины и торф. Модель учитывает логарифмическое первичное и вторичное уплотнение. Ползучесть создается до тех пор, пока имеется эффективное напряжение. В реальности эффективное напряжение приблизительно равно напряжению от собственного веса грунта, это говорит о том, что деформации будут происходить без дополнительного пригруза;

- таликовая область в массиве ММГ представлена сезоннооттаивающими грунтами, которые переместились в массив ММГ ввиду его деградации под откосными частями (состояние талое, консолидация не завершилась), рекомендуемая модель – ползучести слабого грунта;

- ММГ, рекомендуемая модель поведения – Кулона – Мора. Такая модель может быть использована, т. к. данный слой имеет высокие значения прочностных и деформационных характеристик и практически не деформируется.

Таким образом, анализ современных подходов к выбору моделей поведения грунтов для выполнения расчетов методом конечных элементов позволил обосновать модели поведения грунтов для геотехнической модели системы «насыпь – основание» в условиях деградации ММГ в ЯНАО.

Результаты исследования

В настоящей статье для учета особенностей геокриологического состояния характерного для условий ЯНАО участка эксплуатируемой насыпи разработана геотехническая модель поперечного

профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО (рис. 2). Такая модель учитывает как существующие исследования [8–11], так и модели поведения соответствующих грунтовых слоев, представленные выше.

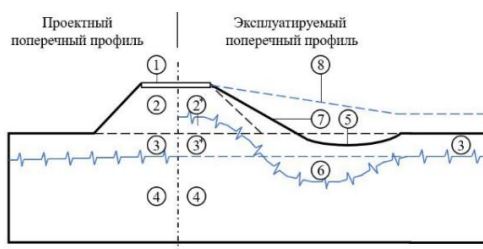


Рис. 2. Геотехническая модель поперечного профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО

На рис. 2 представлены два полупоперечных профиля: левый – проектный, правый – эксплуатируемый, имеющий характерную деформацию. Учитывая анализ слоев поперечного профиля, выполненный выше, и рекомендуемые модели поведения грунтов в условиях исследования, элементы модели можно свести в табл. 1.

Таблица 1

Элементы разработанной модели

Вводные параметры	Ед. изм.	Примечание
Геометрические параметры модели		
Ширина земляного полотна	м	Принимается по проекту (при новом строительстве) или по результатам обследования
Высота насыпи	м	
Заложение откосов	-	
Глубина и ширина термической просадки (элемент 5)	м	Принимается по результатам обследования
Высота снегового покрова (элемент 8)	м	
1 – дорожная одежда автомобильной дороги (модель линейно-упругая)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимаются по результатам обследования
Коэффициент Пуассона	-	
Модуль упругости	кН/м ²	
2 – проектное очертание тела земляного полотна / 7 – Существующее очертание тело земляного полотна после возникновения деградации ММГ (модель упрочняющегося грунта)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимается по результатам инженерно-геологических изысканий
Коэффициент Пуассона	-	
Секущий модуль жесткости при стандартном	кН/м ²	
Касательный модуль жесткости при первичном нагружении	кН/м ²	
Жесткость при разгрузке / повторном нагружении	кН/м ²	
Удельное сцепление	кН/м ²	
Угол внутреннего трения	градус	
Угол дилатансии	градус	
2* – грунт тела земляного полотна, перешедший в многолетнемерзлое состояние при эксплуатации / 3* – сезонно-оттаивающий грунт, перешедший в многолетнемерзлое состояние при эксплуатации / 4 – многолетнемерзлый грунт основания (модель Кулона – Мора)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимается по результатам инженерно-геологических изысканий
Коэффициент Пуассона	-	
Модуль упругости	кН/м ²	
Угол внутреннего трения	градус	
Угол дилатансии	градус	
3 – сезоннооттаивающий грунт / 6 – таликовая область в массиве ММГ (модель ползучести слабого грунта)		
Удельный вес	кН/м ³	Принимается по результатам инженерно-геологических изысканий
Коэффициент пористости		
Удельное сцепление	кН/м ²	
Угол внутреннего трения	градус	
Модифицированный коэффициент сжимаемости	-	
Модифицированный коэффициент разбухания	-	
Модифицированный коэффициент ползучести	-	

Необходимо отметить, что термическая просадка (элемент 5) образовалась ввиду деградации ММГ, связанной с нарушением естественных условий теплообмена за счет аккумуляции снега (элемент 8) в холодный период года, а также в связи с наличием неудовлетворительного отвода поверхностных вод от земляного полотна и их скопления вдоль подошвы в летний период. Границами термической просадки являются зона перехода высоты снегового покрова (элемент 8) к нормальным значениям для данной местности. Максимальная величина деградации ММГ располагается в зоне термических просадок под откосными частями.

Разработанная модель (см. рис. 2) предполагает возможность ее применения как при новом строительстве, так и для расчетов эксплуатируемой насыпи, имеющей очертание дневной поверхности отличное от проектного, а также понижение кровли ММГ.

Для получения наиболее достоверных результатов расчета методом конечных элементов с учетом ранее выполненного анализа сформулированы следующие положения при составлении геотехнической модели, разработанной авторами:

1 Геотехническая модель поперечного профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО формируется многослойной с учетом выше приведенных рекомендаций по выбору моделей поведения грунтов. Расположение и характеристики слоев принимаются по результатам комплексных инженерных изысканий, в том числе геодезических, геологических, геокриологических и др.

2 Для учета криогенных деформаций кровля ММГ располагается на глубине возможной деградации, определенной по теплотехническому расчету или по натурным измерениям в результате инженерно-геокриологического мониторинга.

3 Границами таликовой области (элемент 5) являются зоны перехода высоты снегового покрова (элемент 8) к нормальным значениям для данной местности.

4 Вес снегового покрова при расчете методом конечных элементов не учитывается, т. к. расчет выполняется при талом состоянии грунтов деятельного слоя (элемент 3).

5 Оценка деформированного состояния геотехнической модели поперечного профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО выполняется с использованием численного моделирования до наступления консолидации грунтов, при этом точность прогнозных расчетов обеспечивается при верификации модели с результатами геокриологического мониторинга.

6 При проектировании термостабилизации грунтов основания или противодеформационных мероприятий, повышающих эксплуатационную надежность, в расчетную модель добавляется нагрузка от транспорта.

Для подтверждения возможности расчетов по разработанной геотехнической модели выполнена ее верификация. Учитывая, что в соответствии с моделью предполагается возможность расчетов как до строительства насыпи, так и в процессе эксплуатации верификация выполнена с использованием проектной документации и результатов инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемого участка автомобильной дороги Надым – Салехард [7].

Участок автомобильной дороги имеет две полосы движения. Земляное полотно представлено насыпью. Дорожная одежда капитального типа с асфальтобетонным покрытием состоит из четырех основных слоев мощностью до 60 см. Инженерно-геологическое строение определено по результатам бурения технических скважин с отбором образцов ненарушенной структуры, дальнейшим их лабораторным испытанием и объединением в инженерно-геологические элементы (рис. 3).

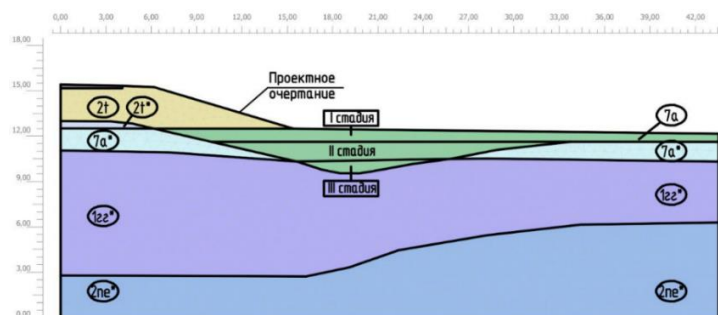


Рис. 3. Цифровая модель полупоперечного профиля на участке автомобильной дороги Надым – Салехард в интерфейсе программного комплекса

Критерием верификации модели будет являться получение качественной и количественной картины деформирования при моделировании проектного очертания насыпи, соответствующей ре-

результатам инженерно-геокриологического мониторинга, выполненного на данном участке. Допускаемой величиной отклонения результатов считается отличие в 30 %, как для прочностных и деформационных характеристик грунтов в соответствии с [13].

В программном комплексе, основанном на методе конечных элементов, была сформирована цифровая модель полупоперечного профиля на участке автомобильной дороги Надым – Салехард (рис. 3). В расчетах используется полупоперечник правый, как имеющий наибольшую термическую просадку.

При верификации была выполнена серия расчетов с целью подтверждения возможности оценки деформаций при различной величине оттаявшей толщи, определенной по результатам натурных наблюдений. Выполненные расчеты геотехнической модели поперечного профиля насыпи в условиях деградации ММГ в ЯНАО на участке автомобильной дороги Надым – Салехард объединены в следующие стадии:

– нулевая стадия – наибольшее промерзание сезонноттаивающих грунтов, грунты естественного основания находятся в мерзлом состоянии, насыпь отсутствует;

– I стадия – насыпь отсыпана до проектного очертания в зимний период, кровля ММГ поднялась в насыпь (ИГЭ-2t*), сезонноттаивающие грунты находятся в талом состоянии (ИГЭ-7a);

– II стадия – деградация ММГ в основании, грунты ИГЭ-7a* переходят в талое состояние ИГЭ-7a, образуется термическая просадка;

– III стадия – продолжение деградации ММГ в основании, грунты ИГЭ-1гг* переходят в талое состояние, грунты ИГЭ-7a занимают место ИГЭ-1гг*. Стадия соответствует существующим инженерно-геологическим условиям на момент обследования [7]. По результатам лабораторных исследований грунтов были получены физико-механические характеристики выделенных инженерно-геологических элементов (рис. 3) необходимые для задания моделей поведения грунтов, описанных ранее (табл. 1), которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Физико-механические характеристики выделенных
инженерно-геологических элементов**

Наименование характеристики	Единица измерения	Номер элемента модели				
		2t	7a	7a*	2пе*	1гг*
		Песок мелкий неоднородный маловлажный средней плотности	Торф сильноразложившийся водонасыщенный	Торф твердомерзлый сильноразложившийся атакситовой криотекстуры	Суглинок легкий пылеватый пластичномерзлый льдистый слоисто-сетчатой криотекстуры при оттаивании текучий	Суглинок легкий с галькой пластичномерзлый слабльдистый массивной криотекстуры при оттаивании мягкопластичный,
Удельный вес	кН/м ³	17,17	12,07	10,99	17,95	18,93
Коэффициент пористости	д.е.	0,619	2,440	-	-	-
Модуль упругости	МПа	-			Не деформируется. > 300 МПа	
Секущий модуль жесткости при стандартном	кН/м ²	9100	-	-	-	-
Касательный модуль жесткости при первичном нагружении	кН/м ²	27600	-	-	-	-
Жесткость при разгрузке / повторном нагружении	кН/м ²	70300	-	-	-	-
Удельное сцепление	кН/м ²	3	30	-	-	-
Угол внутреннего трения	градус	29,7	10	-	-	-
Модифицированный коэффициент сжимаемости	-	-	0,1646	-	-	-
Модифицированный коэффициент разбухания	-	-	0,0532	-	-	-
Модифицированный коэффициент ползучести	-	-	0,0504	-	-	-

Выполненный расчет методом конечных элементов позволил получить деформированный вид цифровой модели полупоперечного профиля. На рис. 4 представлена схема деформирования, объединяющая все стадии расчета. Сплошной заливкой обозначены грунты основания и тела насыпи, которые в процессе деформации остаются неподвижными и не подвергаются значительным перемещениям. Градиентной заливкой выделены грунты, испытывающие деформации, при которых происходит их вдавливание, что отражает сложное взаимодействие между различными слоями. Штриховкой показаны грунты, подверженные перемещениям, а штриховкой с заливкой – те, которые замещают друг друга или переходят из одного состояния в другое. Характерным примером является ИГЭ-7а*, который по мере деградации ММГ переходит в ИГЭ-7а, что наглядно демонстрирует переход грунта из твердомерзлого состояния в талое, что сопровождается значительными перемещениями и изменением его характеристик. Такая визуализация позволяет четко проследить последовательность деформационных процессов, происходящих в насыпи и основании, и оценить их влияние на сооружение в целом.

На первой стадии расчета, при переходе грунтов деятельного слоя (ИГЭ-7а*) в талое состояние (ИГЭ-7а), происходит перемещение дневной поверхности на 0,16 м вблизи подошвы откоса насыпи. Тонкой цветной штриховой линией обозначены очертания тела насыпи после реализации деформаций. В результате грунт насыпи (ИГЭ-2т) вытесняет торф (ИГЭ-7а), частично занимая его место.

На второй стадии расчета происходит деградация ММГ, ИГЭ-7а* переходит в талое состояние. Этот фазовый переход сопровождается новыми деформациями, влекущими за собой образование термической просадки глубиной до 0,34 м. Перемещения на этой стадии показаны цветной штриховой линией. Грунт насыпи продолжает перемещаться, вдавливая и замещая грунт ИГЭ-7а.

На третьей стадии продолжается деградация ММГ, зона термической просадки достигает 0,52 м, ее границы обозначены сплошной утолщенной цветной линией. На этом этапе продолжается оттаивание грунтов, и в нижней части разреза торф ИГЭ-7а вдавливается в мерзлый грунт ИГЭ-1гг*. Очертания насыпи практически не изменяются, а торф ИГЭ-7а под телом насыпи полностью переходит в талое состояние.

Существующее очертание насыпи показано черной утолщенной сплошной линией и практически совпадает с результатами расчета. Реальная термическая просадка составляет 0,58 м, что превышает просадку на третьей стадии расчета на 10,3 %. Для наглядности деформации на рис. 4 визуально увеличены в три раза.

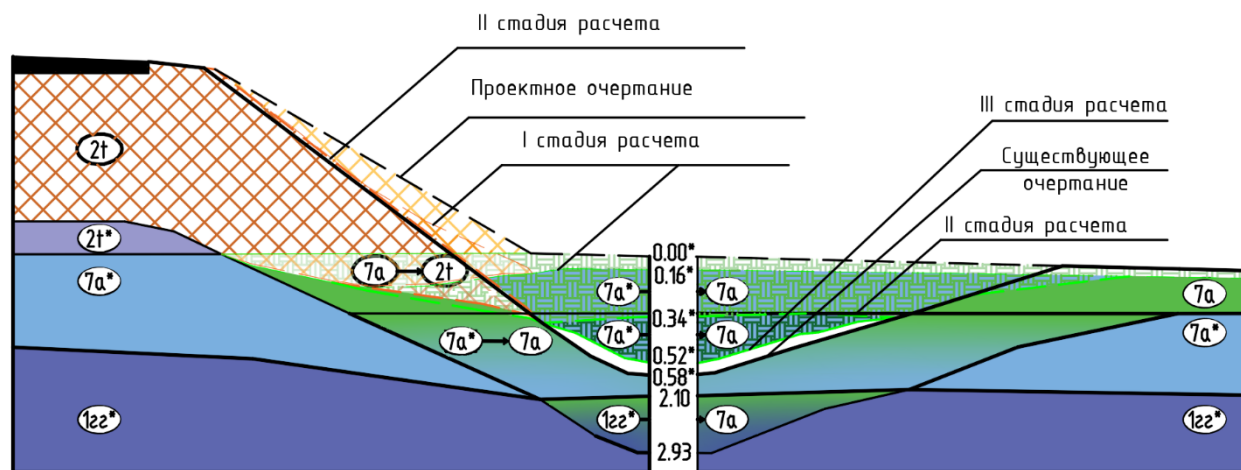


Рис. 4. Деформированный вид цифровой модели полупоперечного профиля

Для возможности подтверждения количественной картины деформирования выполнено наложение деформированного вида и изолиний перемещений узлов сетки по результатам третьей стадии расчета (рис. 5).

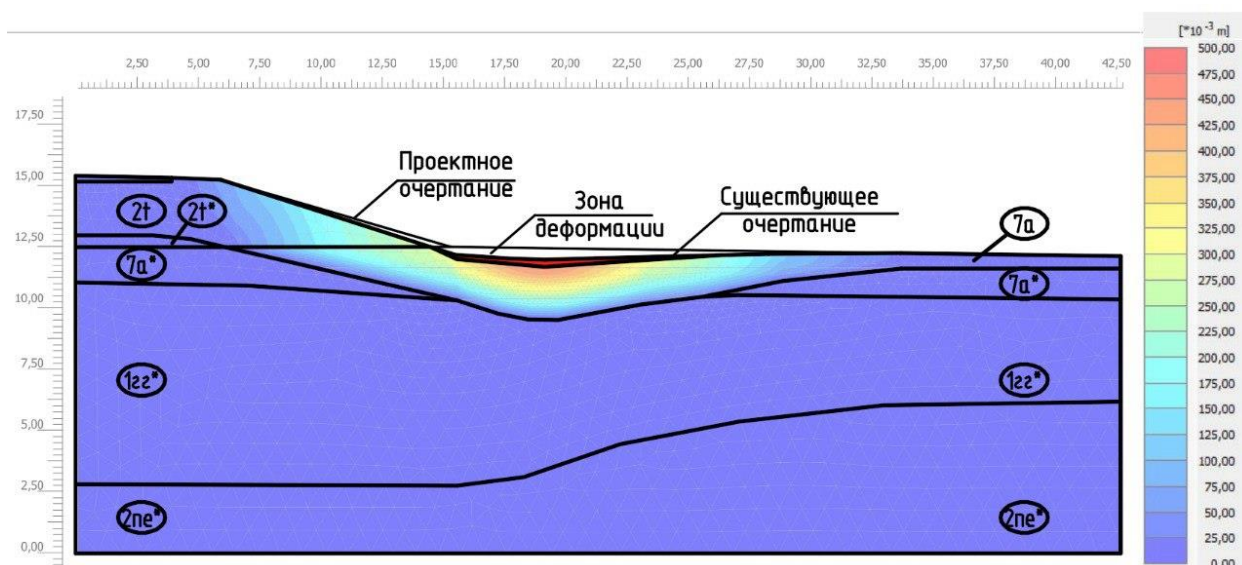


Рис. 5. Качественная и количественная картина деформирования цифровой модели поперечного профиля

По результатам выполненного расчета разработанной модели были получены следующие результаты:

- качественно картина деформирования поперечного профиля на участке автомобильной дороги Надым – Салехард близко отображает деформированный вид цифровой модели (рис. 4), форма термической просадки практически совпадает;

- в откосных частях фиксируются активные сдвиговые смещения грунтов деятельного слоя, в связи с ползучестью и одновременным перераспределением объема слабых грунтов в основании, представленных сильноразложившимся водонасыщенным торфом, который в свою очередь перемещается вниз ввиду вытаивания ледяных включений (рис. 5);

- количественная картина деформирования подтверждается, суммарные перемещения узлов сетки модели достигли в месте расположения термической просадки 0,52 м, что на 10,3 % не совпадает с величиной просадки, определенной по результатам обследования (0,58 м).

Анализируя полученные результаты, можно резюмировать следующее:

- обоснованы модели поведения грунтов для геотехнической модели в условиях деградации ММГ в ЯНАО;

- разработана модель, позволяющая оценивать и прогнозировать деформирование насыпи при деградации ММГ в условиях ЯНАО, не прибегая к анализу характера изменений его температурного поля;

- сформулированы основные положения по моделированию участков, подвергшихся или потенциально подверженных криогенным деформациям;

- подтверждена качественная и количественная картина деформирования при сопоставлении ее с характером деформирования и величиной реальных деформаций в области термической просадки;

- модель верифицирована и может быть использована для учета фактора деформирования в составе методики проектирования.

Эксплуатация линейных транспортных сооружений в условиях деградации ММГ в ЯНАО требует проектирования и реализации специальных противодеформационных мероприятий, оценка эффективности которых возможна с использованием разработанной геотехнической модели.

Список литературы

- 1 Ревин, Б. А. Климатические риски социального развития Ямало-Ненецкого автономного округа / Б. А. Ревин, Т. Л. Харьков // Проблемы прогнозирования. – 2023. – № 4 (199). – С. 157–167. – DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167.
- 2 Государственное автономное учреждение Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики». – URL:

References

- 1 Revin, B. A. Climatic risks of the social development of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug / B. A. Revin, T. L. Kharkov // Problems of forecasting. – 2023. – No. 4 (199). – P. 157–167. – DOI 10.47711/0868-6351-199-157-167.
- 2 The State Autonomous Institution of the Yamalo-Nenets Autonomous District "Scientific

<https://arctic.yanao.ru/presscenter/news/90294/>
(дата обращения: 17.10.2024).

3 Climate Change 2021 : The Physical Science Basis / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.] // Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ; Cambridge University Press : Cambridge, UK. – 2021. – ISBN 978-1-009-15789-6.

4 **Fondjo, S. A. A.** Assessment of the Mineral Composition of Heaving Soils Using Geotechnical Properties / S. A. A. Fondjo, E. Theron // Civil Engineering and Architecture, 8, 619–631. – 2020. – ISSN 2334-2986.

5 **Samec, P.** Soil Degradation Processes Linked to Long-Term Forest-Type Damage / P. Samec, A. Kucera, G. Tomasova // Forest Degradation Under Global Change. IntechOpen, 2023. – ISBN 978-1-80539-496-5.

6 Указ Президента РФ № 529 от 18.06.2024 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» // Президент России [официальный сайт]. – URL: <http://krem-lin.ru/acts/news/74328> (дата обращения: 24.09.2024).

7 Обоснование системы инженерно-геокриологического мониторинга эксплуатируемых насыпей линейных транспортных сооружений в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов, Р. С. Печенкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (73). – С. 68–76. – DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

8 **Зарецкий, Ю. К.** Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю. К. Зарецкий. – Москва : Стройиздат, 1988. – 352 с. – ISBN 5-274-00297-3.

9 **Ланис, А. Л.** Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев, Д. А. Усов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (58). – С. 104–111. – ISSN 1815-9265.

10 **Ашпиз, Е. С.** Земляное полотно в условиях многолетнемерзлых грунтов северного широтного хода / Е. С. Ашпиз // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 22–25. – ISSN 0131-5765.

11 **Вавринюк, Т. С.** Оценка устойчивости и деформативности земляного полотна железных дорог в условиях распространения мерзлоты : специальность 05.22.06 «Железнодорожный

Center for Arctic Studies". – URL: <https://arctic.yanao.ru/presscenter/news/90294/> / (date of access: 10/17/2024).

3 Climate Change 2021 : The Physical Science Basis / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.] // Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ; Cambridge University Press : Cambridge, UK. – 2021. – ISBN 978-1-009-15789-6.

4 **Fondjo, S. A. A.** Assessment of the Mineral Composition of Heaving Soils Using Geotechnical Properties / S. A. A. Fondjo, E. Theron // Civil Engineering and Architecture, 8, 619–631. – 2020. – ISSN 2334-2986.

5 **Samec, P.** Soil Degradation Processes Linked to Long-Term Forest-Type Damage / P. Samec, A. Kucera, G. Tomasova // Forest Degradation Under Global Change. IntechOpen, 2023. – ISBN 978-1-80539-496-5.

6 Decree of the President of the Russian Federation No. 529 dated 18.06.2024 "On approval of priority areas of scientific and technological development and the list of the most important high-tech technologies" // President of Russia [Official website]. – URL: <http://krem-lin.ru/acts/news/74328> (date of access: 09/24/2024).

7 Substantiation of the system of engineering and geocryological monitoring of operated embankments of linear transport structures in the conditions of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug / A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, D. A. Usov, R. S. Pechenkin // The Siberian Transport University Bulletin. – 2025. – No. 1 (73). – P. 68–76. – DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_68.

8 **Zaretsky, Yu. K.** The viscoplasticity of soils and calculations of structures / Yu. K. Zaretsky. – Moscow : Stroyizdat, 1988. – 352 p. – ISBN 5-274-00297-3.

9 **Lanis, A. L.** The effect of thawing of seasonally frozen soils on the deformation of the earth bed / A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, D. A. Usov // The Siberian Transport University Bulletin. – 2021. – No. 3 (58). – P. 104–111. – ISSN 1815-9265.

10 **Ashpiz, E. S.** The earth bed in the conditions of permafrost soils of the northern latitudinal course / E. S. Ashpiz // Track and track facilities. – 2021. – No. 3. – P. 22–25. – ISSN 0131-5765.

11 **Vavrinyuk, T. S.** Assessment of the stability and deformability of the railway roadbed in conditions of permafrost spread : specialty 05.22.06 "Railway track, survey and design of railways" :

путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вавринюк Татьяна Сергеевна; МГУПС (МИИТ). – Москва, 2013. – 204 с.

12 **Schanz, T.** On the Modeling of the Mechanical Behavior of Friction Materials. Reports of the Institute of Geotechnics 45 / T. Schanz // University of Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 p.

13 PLAXIS, 2D Version 8 / R. B. J. Brinkgreve [et al.]. – Rotterdam: Balkema, 1997. – 200 p. – ISBN 90-5410-891-3.

14 **ГОСТ 20522-2012.** Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2013.

dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Vavrinyuk Tatiana Sergeevna; MGUPS (MIIT). – Moscow, 2013. – 204 p.

12 **Schanz, T.** On the Modeling of the Mechanical Behavior of Friction Materials. Reports of the Institute of Geotechnics 45 / T. Schanz // University of Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 p.

13 PLAXIS, 2D Version 8 / R. B. J. Brinkgreve [et al.]. – Rotterdam: Balkema, 1997. – 200 p. – ISBN 90-5410-891-3.

14 **GOST 20522-2012.** Soils. Methods of statistical processing of test results. – Moscow: Standartinform, 2013.

A. L. Lanis, D. A. Usov, E. I. Nagaev, V. E. Pushkarev

GEOTECHNICAL MODEL OF THE "EMBANKMENT – FOUNDATION" SYSTEM UNDER CONDITIONS OF PERMAFROST SOIL DEGRADATION IN THE YAMALO-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT (YNAO)

Abstract. The degradation of permafrost soils in the Yamalo-Nenets Autonomous District (YNAO) shows a negative trend of increasing, which is associated with both climate change and human engineering and economic activities. The article examines the issue of the occurrence of ground subsidence in the foundation of linear transport infrastructure in the Arctic zone of the Russian Federation from the perspective of establishing a relationship between cryogenic deformations and soil characteristics. A geotechnical model of the "embankment – foundation" system has been developed for conditions of permafrost degradation in the YNAO, enabling the design of measures to improve operational reliability through soil thermal stabilization or anti-deformation structures. To confirm the feasibility of calculations based on the developed geotechnical model, its verification was carried out by comparing qualitative and quantitative deformation patterns with the results of engineering-geocryological monitoring of an operational section of the Nadym – Salekhard highway.

Keywords: permafrost soil degradation, cryogenic deformations, permafrost soils, embankment, geotechnical model, transport facilities.

For citation: Geotechnical model of the "embankment-foundation" system under conditions of permafrost soil degradation in the Yamalo-Nenets Autonomous District (YNAO) / A. L. Lanis, D. A. Usov, E. I. Nagaev, V. E. Pushkarev // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 8–18. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_8.

Сведения об авторах

Ланис Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), кафедра «Путь и путевое хозяйство», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: alangeo@bk.ru

Усов Дмитрий Андреевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), кафедра «Путь и путевое хозяйство», кандидат технических наук, доцент, e-mail: usovda96@ya.ru

Information about the authors

Lanis Alexey Leonidovich

Siberian State Transport University (STU), Chair "Railway and Railroad Facilities", Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Chair, e-mail: alangeo@bk.ru

Usov Dmitry Andreevich

Siberian State Transport University (STU), Chair "Railway and Railroad Facilities", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: usovda96@ya.ru

Нагаев Егор Игоревич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
преподаватель,
e-mail: einagaev@mail.ru

Пушкарев Владислав Евгеньевич

Школа естественных наук,
Тюменский государственный университет,
ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения
Арктики»,
кафедра прикладной и технической физики,
младший научный сотрудник,
аспирант,
e-mail: vladpuskr@mail.ru

Nagaev Egor Igorevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair "Railway and Railroad Facilities",
Lecturer,
e-mail: einagaev@mail.ru

Pushkarev Vladislav Evgenievich

School of Natural Sciences,
Tyumen State University, State Autonomous
Institution of Yamal-Nenets Autonomous District "
Scientific Center for Arctic Studies",
Chair of Applied and Technical Physics,
Junior Researcher,
Postgraduate Student,
e-mail: vladpuskr@mail.ru