

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Кулаков А.П., Романов А.В. — Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 4. – С. 125 - 157. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.4.68814 EDN: ICMZSC URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=68814

Особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород

Хименков Александр Николаевич

кандидат геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник, Институт геоэкологии РАН

101000, Россия, г. Москва, Уланский проезд, 13, стр. 2

✉ a_khimenkov@mail.ru



Сергеев Дмитрий Олегович

кандидат геолого-минералогических наук

заведующий, Институт геоэкологии Российской академии наук

101000, Россия, г. Москва, Уланский проезд, 13, стр. 2

✉ cryo2@yandex.ru



Кулаков Артём Павлович

младший научный сотрудник Институт геоэкологии РАН

101000, Россия, г. Москва, ул. Уланский, 13 строение 2

✉ unruso@mail.ru



Романов Андрей Вячеславович

Главный инженер, ФКУ УПРДОР Забайкалье

672010, Россия, Забайкальский край, г. Чита, ул. Анохина, 17

✉ uprdorzabaikalie@mail.ru



[Статья из рубрики "Инженерная геология холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.4.68814

EDN:

ICMZSC

Дата направления статьи в редакцию:

26-10-2023

Дата публикации:

21-12-2023

Аннотация: Объектом исследования предлагаемой статьи является оценка состояния инженерно-геокриологического мониторинга геотехсистем (ГТС) автомобильных дорог на территории распространения многолетнемёрзлых пород. Предмет исследования – комплекс мероприятий по сбору, обработке и накоплению данных о деформациях автомобильных дорог, выявлению причин их появления и принятию решений по их устранению. Авторы подробно рассматривают такие аспекты темы, как причины возникновения деформаций объектов автодороги в разных геокриологических условиях. Особое внимание уделяется анализу различных вариантов получения первичной информации. Автомобильные дороги в криолитозоне с самого начала эксплуатации подвергаются интенсивным деформациям, которые возобновляются и после проведения ремонтно-восстановительных работ. Причиной этого являются не только нарушения в проведении изыскательских и проектных работах, но и воздействие данных объектов на мерзлотные условия территории, вызывающие активизацию комплекса криогенных процессов. Основным методом, используемым в данной публикации, является анализ фондовых и литературных материалов по мерзлотным условиям и криогенным процессам на сооружениях автомобильных дорог и прилегающих территорий. Основными выводами проведённого исследования являются: деформации на автомобильных дорогах в криолитозоне обусловлены комплексом причин, связанных с интенсивными фазовыми переходами воды в толщах горных пород, что кардинально отличает их от аналогичных геосистем, сформированных в более южных районах; инженерно-геокриологический мониторинг рассматриваемых объектов необходимо осуществлять на основе взаимодействия эксплуатирующей организации, структуры ведущей научное сопровождение и центра принятия управленческих решений; существующая нормативная база не соответствует проблемам возникшим при эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне. Новизна исследования заключается в том, что были совместно рассмотрены различные варианты мерзлотных условий, наблюдаемые криогенные процессы, совокупность деформаций объектов автомобильных дорог в области распространения многолетнемёрзлых пород, соотношение стационарных и периодических наблюдений, структура информационного и организационного обеспечения.

Ключевые слова:

автомобильная дорога, земляное полотно, деформации, криолитозона, мерзлые породы, термокарст, термоэрозия, геотехническая система, геотехнический мониторинг, инженерно-геокриологический мониторинг

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122022400105-9 по теме "Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических

процессов для снижения уровня их негативных последствий”.

Введение

В последние годы на территориях распространения многолетнемёрзлых пород построены тысячи километров современных автомобильных дорог с твёрдым покрытием. Как оказалось, существующие методы проектирования, строительства и эксплуатации не обеспечивают необходимых параметров надёжности и безопасности функционирования данных инженерных сооружений. Значительные участки дорожного полотна оказались деформированы сразу после строительства. Разрушения продолжаются в процессе эксплуатации, причём повторяются и после проведения ремонтных работ. Данные тенденции наблюдаются во всех регионах России (Западная Сибирь, Таймыр, Якутия, Забайкалье), с различными геокриологическими условиями, что нашло отражение в публикациях ряда исследователей: В. Г. Кондратьев, С.В. Кондратьев, Е. А. Бедрин, А. А. Дубенков, В. А. Исаков, В.И. Гребенец, Я. И. Торговкин и др.

Очевидно, что частично данная проблема может быть решена за счёт улучшения качества работ на стадиях изысканий, проектирования и строительства. Одной из причин этого является недостаточная изученность закономерностей взаимодействия инженерных сооружений дорог и окружающей природной среды, выражающаяся в формировании особой геотехнической системы (ГТС). Следует учитывать, что создание ГТС автомобильная дорога-мёрзлый грунт, значительно влияет на геокриологические условия территорий, меняя рельеф, температурный режим и свойства мёрзлых пород, поверхностные и гидрологические условия, растительность, обводнённость и др. Данные ГТС, имея протяжённость в сотни и тысячи километров, активно влияют на мерзлотные условия, что выражается в резком усилении парагенетически связанных комплексов криогенных процессов, приводящих к развитию деформаций на объектах автомобильных дорог. Инженерные сооружения (насыпи, выемки, водопропускные сооружения) и естественные грунты в их основании – будут претерпевать изменения под воздействием соответственно природных и техногенных факторов. То есть происходит своего рода адаптация созданной ГТС к изменённым геокриологическим условиям, с потерей функций технической составляющей. Этой отрицательной адаптации следует противопоставить положительную адаптацию, заключающуюся в формировании новой устойчивой ГТС (хотя и на локальных участках) соответствующей изменившимся природным условиям. Для этого необходимо проведение комплекса работ включающего:

1. Фиксации деформаций, наблюдаемых на сооружениях автомобильной дороги (полотно, насыпь, берма, придорожная канава и др.) выявление разрушающихся участков;
2. Проведение дополнительных исследований по выявлению деструктивных процессов, а также тенденции и интенсивности их развития;
3. Разработка проектных решений, обеспечивающих функционирование нарушенного участка в новых прогнозируемых геокриологических условиях;
4. Проведение инженерно-восстановительных работ, обеспечивающих устойчивое длительное функционирование объекта.

Данный перечень работ должен входить в комплекс инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, проложенных на территории распространения многолетнемёрзлых пород. В настоящее время, нормативная база, регламентирующая данные направления разработана недостаточно. В «СП 313.1325800.2017. Свод правил. Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и

строительства» основное внимание уделено технологиям строительства в криолитозоне. ОДМ 218.2.086-2019 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ, СТРОИТЕЛЬСТВ предназначен для опытно экспериментального применения при проектировании и реконструкции дорожных насыпей, на многолетнемёрзлых грунтах и разработки прогноза их тепловой устойчивости.. ОДН 218.046-01, ПНСТ 542-2021, ОДМ 218.8.001-2009 «Методические рекомендации по специализированному гидрометеорологическому обеспечению дорожного хозяйства». и ОДМ 218.8.002-2010 «Методические рекомендации по зимнему содержанию автомобильных дорог с использованием специализированной гидрометеорологической информации (для опытного применения)» разработаны для других условий и использоваться могут фрагментарно. Введённый в 2023 г. ОДМ 218.11.007-2023 «Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических мониторинговых стационарных постов в полосе отвода автомобильных дорог в криолитозоне», значительно улучшил ситуацию. В нём объединены различные направления контроля состояния автомобильных дорог, проходящих на территории распространения многолетнемерзлых пород:

- сбор, хранение, обработка и анализ информации о состоянии мерзлых грунтов, происходящих в них процессах и явлениях, а также изменениях их состояния;
- оценка состояния мерзлых грунтов и прогноз изменения состояния под воздействием природных и (или) техногенных факторов;
- разработка предложений о предотвращении негативного воздействия на многолетнемерзлые грунты;
- оценка эффективности проводимых мероприятий по контролю за состоянием мерзлых грунтов;
- создание базы данных интегрирующих информацию, полученную в ходе проведения мониторинга.

Введенный ОДМ, несомненно, будет способствовать улучшению контроля за состоянием автомобильных дорог, проложенных в районах распространения многолетнемерзлых пород. Принятый документ носит рекомендательный характер, поэтому здесь не проработаны некоторые технологические аспекты, которые снижают эффективность его применения. Не указаны, какое подразделение и в каком режиме, осуществляет получение первичной информации. Это могут делать эксплуатирующие организации в режиме нерегулярного посещения или в периодическом режиме с чётким указанием сроков. Их могут осуществлять и сотрудники аналитического центра, сформированного эксплуатирующей организацией, или аналогичного центра в рамках Росавтодора. Данные наблюдения могут проводить и сторонние организации, осуществляющие научное сопровождение. Не показано как будет синхронизироваться информация со стационарных постов автоматического наблюдения и информация, полученная из полевых наблюдений. Из ОДМ не ясно, где будет сосредоточена первичная информация и как будут организованы информационные потоки между различными подразделениями. Не отражён в нём порядок проведения углублённых инженерно-геокриологических работ на участках интенсивного развития опасных криогенных процессов. Не показан алгоритм принятия управленческих решений. Эти и другие нерешённые вопросы создания системы инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород, показывают, что данная

проблема далека от своего завершения и требует дальнейшей разработки

Целью данной статьи является анализ состояния существующих методов инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территории распространения многолетнемерзлых пород. А также разработка предложений по его совершенствованию.

Мерзлотные условия, криогенные процессы, деформации объектов автомобильных дорог в области распространения многолетнемерзлых пород

Отличительной чертой автомобильных дорог на территории криолитозоны является разнообразие мерзлотных условий, проявляющееся в различии взаимодействия автомобильной дороги с грунтами оснований. Грунтовые толщи на пересекаемых автомобильными и железными дорогами территориях отличаются большим разнообразием мерзлотных условий, отражающихся в криогенном строении, льдистости, температуре. Формируемые в результате строительства дороги насыпи или выемки меняют теплообмен с подстилающими породами и вызывают значительные изменения в них. Пересечение таликов может привести к их промерзанию, высокотемпературные мерзлые породы могут, наоборот оттаять, а в низкотемпературных температура может повыситься. Температурным изменениям соответствуют фазовые переходы и миграционные процессы, которые в свою очередь вызовут развитие серии криогенных процессов в подстилающих породах, просадки, пучение, фильтрацию воды термосуффозию и др., различие типов теплового взаимодействия насыпей и подстилающих пород. Геоморфологические, геологические, климатические, геоботанические и геокриологические условия различных регионов криолитозоны влияют на динамику температурного поля, восприимчивость вечномёрзлых пород к техногенным нагрузкам и потенциал развития неблагоприятных криогенных процессов в пределах ГТС автомобильных и железных дорог [\[1\]](#).

В качестве примера приведём пространственную дифференциацию температуры грунтов в ландшафтах федеральной дороги «Колыма». Грунты с высокими температурами (от 0 до -2°C) занимают 25% территории, средние температуры (от -2 до -4°C) встречаются на 54% рассматриваемой территории, грунты с низкими температурами (от -4 до -6°C) занимают 18% и самые низкие температуры грунтов (ниже -6°C) встречаются на 3% территории. Значения глубины сезонного протаивания в буферной зоне автомобильной дороги «Колыма» подразделяются на 5 интервалов. Значения до 1 м и 1-1.5 м занимают по 16% территории. Глубина протаивания 1.5-2 м прослеживается в 30% от общей территории, >2 м занимает 33% и 2-2.5 м – 5% от общей территории [\[2\]](#).

Наряду с локальными различиями геокриологических условий, влияющих на взаимодействие дороги и подстилающих пород и отражающих ландшафтную неоднородность, значительную роль играет и их региональная изменчивость, связанная с зональными климатическими изменениями. Проведённое В. А. Исаковым моделирование температурного поля для 11 пунктов в криолитозоне России показало наличие значительной региональной дифференциации в динамике геокриологической обстановки в основании дорожных насыпей [\[1\]](#). Им было выделено 4 основных типа квазистационарного поля (с относительно стабильной среднегодовой температурой грунтов на разных глубинах) насыпных и естественных грунтов в пределах ГТС автомобильных и железных дорог в криолитозоне (рис. 1).

А) Устойчивый тип (Амдерма, Анадырь) – характеризуется стабильностью или понижением температуры насыпных и естественных грунтов и подъёмом кровли вечной

мерзлоты в пределах сооружения.

Б) Переходный низкотемпературный тип (Воркута, Тазовский, Норильск) характеризуется повышением температуры грунтов в пределах отрицательных значений при подъёме кровли вечной мерзлоты и, в отдельных случаях, локальным понижением температуры под основной площадкой насыпи. Положение верхней границы многолетнемерзлых пород приближена к конфигурации поверхности насыпи. У подножий откосов формируются таликовые зоны незначительной (до 1-2 м) мощности.

В) Переходный высокотемпературный тип (Нарьян-Мар, Салехард, Якутск) характеризуется значительным повышением температуры в основании насыпи и формированием таликовых зон под откосами насыпей. Под основной площадкой сохраняется отрицательная среднегодовая температура насыпных и многолетнемерзлое состояние естественных грунтов при их высокой (не ниже -1°C) температуре.

Г) Неустойчивый тип (Краснощелье, Чита, Бомнак) – характеризуется формированием значительной по мощности чаши оттаивания под дорожной насыпью. Характер залегания кровли многолетнемерзлых грунтов для пунктов с различными типами квазистационарного температурного поля грунтов представлен на рис. 1.

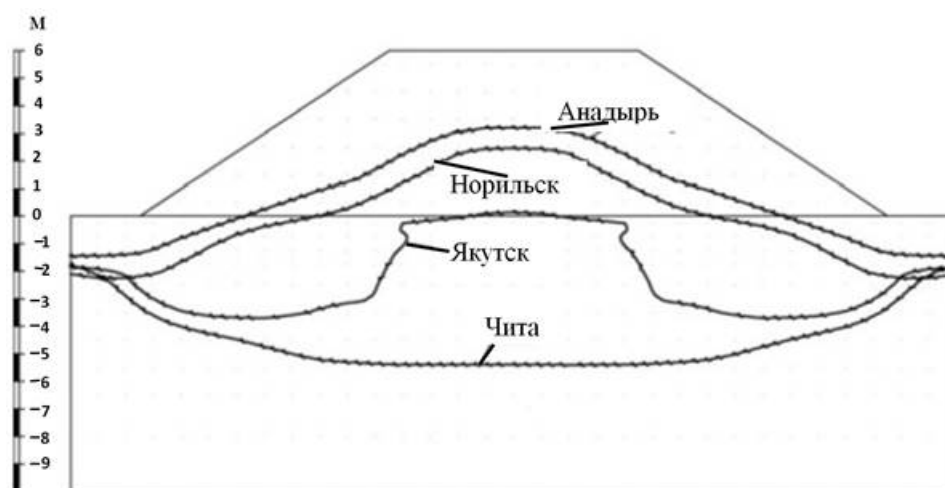


Рис. 1. Положение кровли многолетнемерзлых пород в основании насыпи в регионах, характеризующихся различными типами квазистационарного состояния температурного поля [\[1\]](#).

Трансформация мерзлотных условий и формирование интразональных ландшафтов, связанных с активизацией криогенных процессов на участках, прилегающих к автомобильным дорогам.

Строительство и эксплуатация автомобильных и железных дорог приводят к значительным изменениям мерзлотных условий на прилегающих территориях и активизации на них опасных инженерно-геокриологических процессов. Здесь активно начинает формироваться зона природно-антропогенных ландшафтов, в которых наблюдается трансформация первичной структуры исходного ландшафта. Вследствие дополнительной обводнённости или иссушения (вблизи выемок) изменяется состав растительных сообществ. Вследствие нарушения поверхностного стока образуются поверхностные водоёмы, вблизи водопропускных сооружений активизируются эрозионные и термоэрозионные процессы, Нарушение условий теплообмена, приводят к протаиванию льдистых грунтов и просадкам. В других случаях нарушение поверхностных условий может привести к промерзанию талых грунтов и пучению. В бортах выемок и в

местах водопропуска начинают активно развиваться наледи. Поскольку автомобильные дороги имеют протяжённость в сотни и тысячи километров, то при их строительстве зональные и региональные факторы формирующие ландшафты, и соответственно мерзлотные условия, трансформируются. Вдоль автомобильных формируется узкая зона *интразональных ландшафтов* (от лат. «intra» – внутри) с повышенной динамикой природных, в том числе криогенных процессов, представляющих опасность для инженерных сооружений. Данные ландшафты возникают, когда какой-либо из факторов, важных для их образования, в нашем случае ГТС – автомобильная дорога, настолько сильно выражен, что подавляет или меняет влияние других факторов (климата). Таким образом, ландшафт (неделимый по зональным и региональным факторам) распадется на локальные геосистемы, отличающиеся по вещественному составу и структуре поверхностных отложений, мезо- и микроформам рельефа, влагообеспеченности, температурному режиму. Выделяется 5 групп по степени активизации процессов, формирующих интразональные ландшафты: слабая, умеренная, средняя, сильная, катастрофическая. Степень активизации оценивается, в первую очередь, по площади ландшафта, которая может быть поражена криогенными процессами на территории освоения. Кроме того, оценивается скорость развития криогенных процессов, степень преобразования и расчленения первичного рельефа, возможность затухания процессов за счет естественных природных факторов. Слабая активизация процессов означает, что криогенные процессы в связи с техногенными причинами занимают не более 10% площади ландшафта, умеренная – до 50%, средняя – примерно половину площади ландшафта, сильная – более 50%, катастрофическая – более 90% [3].

В качестве примера влияния автомобильной дороги на прилегающие территории рассмотрены результаты исследований изменения поверхностных условий и криогенных процессов в пределах торфяника, пересекаемого автомобильной дорогой, покрытой бетонными плитами на территории Пур-Тазовского междуречья (рис. 2) [4]. На участках, прилегающих к насыпи автомобильной дороги, наблюдается существенное различие между темпами деградации участка к юго-востоку и к северо-западу от автомобильной дороги. При таянии снега сток с водоразделов (красные стрелки) скапливался у подошвы склона водораздела. Далее сток распределялся частью к озерам и частью к дороге (желтые стрелки). Скопление воды в придорожных канавах привело к развитию термокарста. Здесь термоденудационные процессы, связанные с вытаиванием полигонально-жильных льдов ПЖЛ, аналогичны по обеим сторонам дороги. На некотором удалении соотношение процессов резко меняется. На исследуемой территории наблюдается общий уклон поверхности в северо-западном направлении. В этом направлении в ненарушенных условиях сбрасывались поверхностные воды. Дорожная насыпь явилась своеобразной плотинкой, затрудняющей естественный сброс поверхностных вод. В основании насыпи, проложена водопропускная труба, приуроченная к понижению рельефа. На северо-западном участке по вытаявшим жильным льдам сформировался термоэрозионный овраг, вершина которого приурочена водопропускной трубе. По нему поверхностные воды отводились в ближайшее озеро. Прилегающие поверхности остаются стабильными, здесь активизации термоденудационных процессов не отмечается. На юго-восточной части территории наблюдается иная картина. Здесь, насыпь перекрывает поверхностный сток. Водопропускная труба не обеспечивает достаточный сброс воды. В результате подпора поверхностных вод происходит резкая активизация термокарста по повторно-жильным льдам (рис. 2).

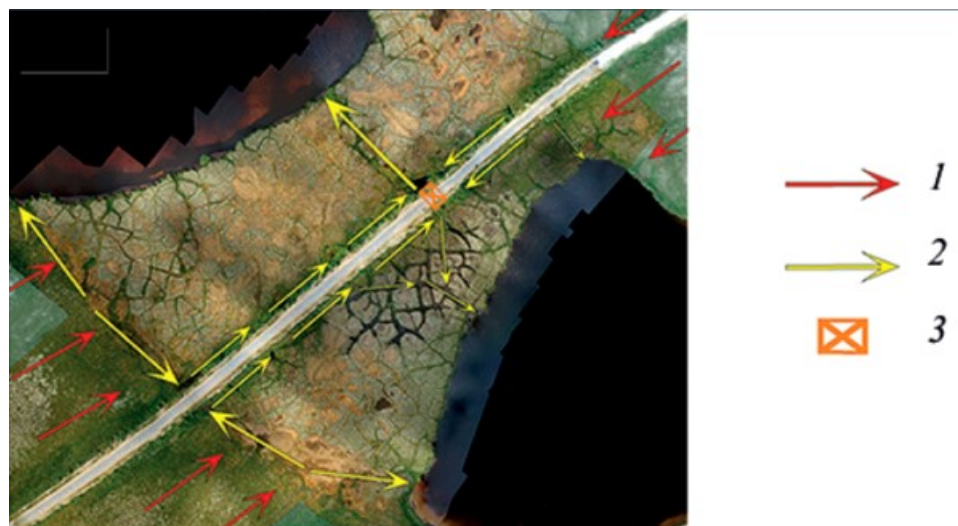


Рис. 2. Схема перераспределения поверхностного стока воды: 1 – сток с водораздела; 2 – сток вдоль подножья насыпи и вдоль полигональных канав торфяника; 3 – водопропускная труба [4].

Автомобильная дорога, затруднив поверхностный сток, оказала стабилизирующее действие на термоденудационные процессы в северо-западной части полигонального торфяника, сведя их к локальному развитию термоэрозионных оврагов. В юго-восточной части наоборот разрушение мёрзлых пород активизировалось за счёт площадного развития термокарста по повторно-жильным льдам [4]. Аналогичный пример рассмотрен в работе Я. В. Тихонравовой [5], здесь также наблюдается значительное влияние автомобильной дороги в активизации термоденудационных процессов на прилегающих территориях и резкая асимметричность в их проявлениях (рис. 3).

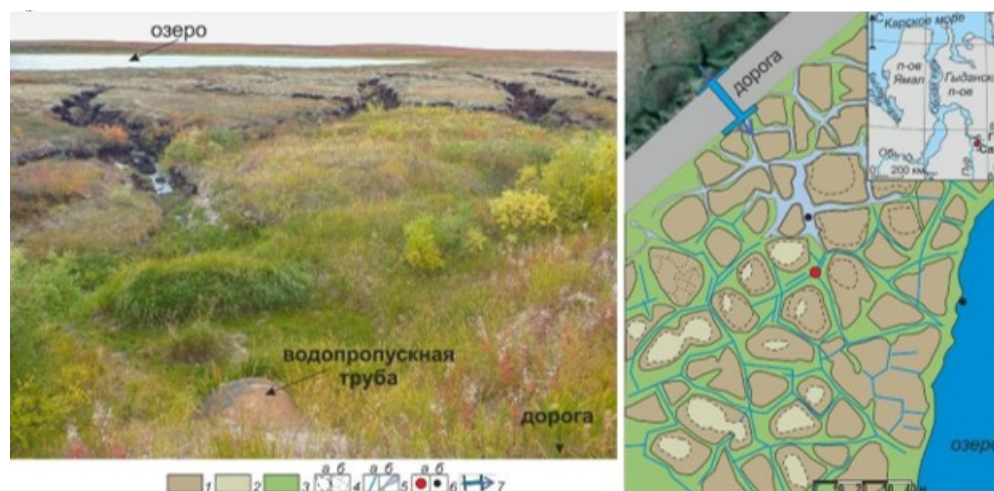


Рис. 3. Расположение и микрорельеф торфяника в хасырее Пур-Тазовского междуречья (рисунок составлен: Я.В. Тихонравовой, Е.А. Слагодой): 1 – полигоны; 2 – полигональные ванны, заболоченные понижения; 3 – межполигональные понижения; 4 – контуры валиков полигонов (а), трещины высокого порядка генерации (б); 5 – обводненные межполигональные понижения (а), обводненные промоины по вытаявшим участкам полигонально-жильных льдов (б); 6 – расчистка В8 (а), места отбора проб поверхностных вод (б); 7 – водопропускная труба и направление стока [5].

Деформации полотна автомобильных дорог в условиях распространения многолетнемерзлых пород.

Деформации автомобильных дорог, эксплуатируемых в области распространения многолетнемерзлых пород, имеют различные формы, масштабы проявлений и вызывающие их причины. Они распространены во всех климатических и ландшафтных зонах, от суровых условий северной Арктики до южной зоны распространения многолетнемерзлых пород [\[6, 7\]](#) и др. Рассмотрим некоторые типовые виды деформаций.

Длинноволновые продольные деформации. Данный тип деформаций развивается в условиях закономерных изменений продольных уклонов земляного полотна в соответствии с неровностями естественного рельефа и связан с комплексом причин: изменением высоты насыпи при переходе от котловины к поверхности останцов, где высота насыпи резко уменьшается; неровностью кровли мерзлых пород, связанной с наличием таликов в котловинах; отличием температурного режима и особенностей взаимодействия с грунтами оснований насыпей различной мощности. Вследствие этого развиваются деформации, масштаб которых сопоставим с масштабом изменения естественного рельефа в основании насыпи. Длинноволновые продольные деформации широко распространены на автомобильных дорогах. Они могут иметь различную амплитуду (от нескольких десятков сантиметров до первых метров) и протяжённость (которая, как правило, превышает 50 м и может достигать сотен метров).

Продольные просадки высоких насыпей. Он связан с особенностями взаимодействия высоких насыпей с мерзлыми грунтами оснований, в частности с изменением положения кровли многолетнемерзлых пород при пересечении автомобильной дорогой термокарстовых котловин и термоплатационных (останцевых) поверхностей. Данный тип деформаций отличается неравномерностью изменения уклонов в поперечном и продольном сечении, их большими значениями и резкими «переломами» продольного профиля.

Локальные просадки основной площадки насыпи. Образование локальных просадок связано преимущественно с пересечением насыпью постоянных или временных водотоков, а также ложбин стока. Они имеют размеры до нескольких метров в длину и распространяются на всю ширину основной площадки при глубине просадок до 10–20 см. Происхождение данных деформаций обусловлено неправильным функционированием водопропускных сооружений. Если водопропускные сооружения не обеспечивают водопропуска, или в их основании формируются талые зоны, то в теле насыпи или под ней могут формироваться локальные водотоки, а вода дренируется через тело насыпи или оттаявшие грунты основания. Это вызывает оттаивание и понижение поверхности грунтов оснований и площадки насыпи. Локальные просадки вызывают резкие изменения конфигурации дорожного полотна на коротких отрезках, а также интенсивно деформируют само полотно.

Деформации полотна низких насыпей.

Этот тип деформаций характерен для низких насыпей высотой от 0.7 до 3.0 м. Малая высота и сравнительно небольшая площадь подошвы насыпи приводят к большей зависимости показателей устойчивости верхнего горизонта естественных грунтов в ее основании от динамической нагрузки. Динамические нагрузки сравнительно большой величины, передающиеся грунтам в основании земляного полотна, в зимний период приводят к упругим и пластическим деформациям мерзлых грунтов, а в летний период, при оттаивании сезонно-талых грунтов под насыпью – к разжижению и проявлению тиксотропных свойств. Воздействие динамических нагрузок на этот сильно увлажненный оттаявший горизонт обуславливает малую амплитуду и высокую интенсивность деформаций [\[6\]](#).

Деформации откосов насыпей при сезонном оттаивании и промерзании грунтов насыпи.

Эти деформации имеют разнообразный характер: эрозия откосов, трещины у бровки основной площадки, отседание откосов и оснований площадки. При протаивании главной причиной их возникновения является снижение несущей способности естественных и насыпных грунтов в основании откоса, что ведет к просадкам, увеличению крутизны откоса и снижению прочности смерзания грунтов в теле насыпи. Протаивание грунта происходит не только в естественных, но и в насыпных грунтах, что делает их более уязвимыми к процессу эрозии. Данные деформации формируются, в первую очередь, в результате подтопления насыпи и абразии берегов термокарстовых озер, образовавшихся вдоль трассы дороги. Поэтому зачастую подошва насыпи уходит непосредственно в озеро (при этом развивается термоабразия естественных и техногенных грунтов). Несмотря на очень незначительную высоту (не более 20 см) и, соответственно, энергию волн, при условии практически полного отсутствия структурных связей в грунте даже очень слабая волновая деятельность приводит к значительным величинам абразионного разрушения (рис. 4). Оттаивание мерзлых грунтов основания насыпи вызывает просадки грунтов и, как следствие, увеличение крутизны откоса, что, в свою очередь, ведёт к усилению процессов эрозии и гравитационного сноса переувлажненного оттаивающего материала насыпи. Неравномерное оттаивание мерзлых пород в основании насыпи ведет к поперечным деформациям, вызывая растрескивание асфальтового покрытия.

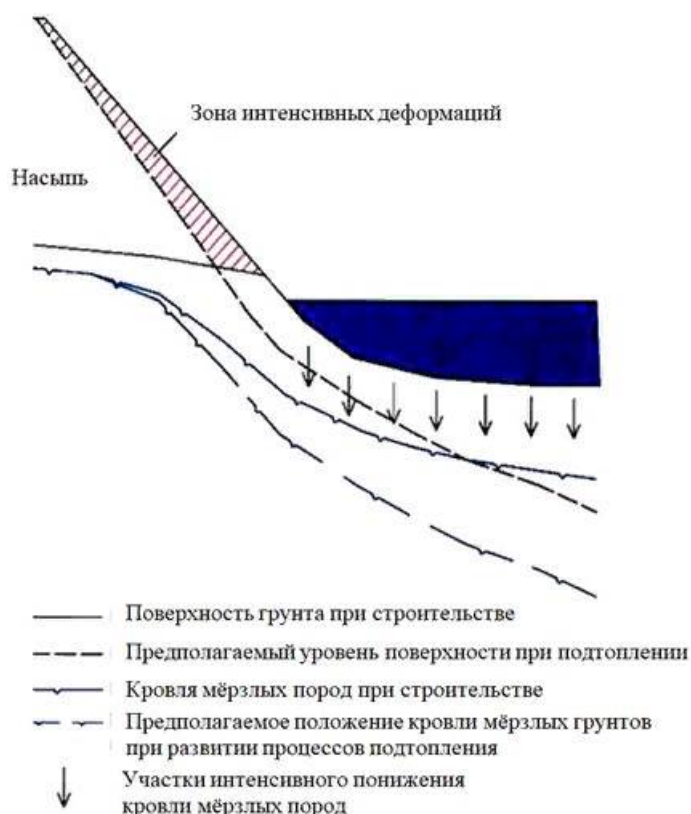


Рис. 4. Активизация деформаций при увеличении крутизны откоса

насыпи в результате подтопления [\[8\]](#)

Ступенчатое отседание основной площадки насыпи связано с неравномерностью оттаивания и осадки мерзлых грунтов целыми блоками с формированием «ступенек» (рис. 5).



Рис. 5. Ступенчатое отседание основной площадки насыпи автомобильной дороги
«Норильск – Талнах» [\[8\]](#)

Ступени могут занимать значительную часть основной площадки. Разница в уровнях между «ступенями» может достигать 5 см. Напряжения, вызываемые неравномерными осадками основания, приводят к формированию трещин в асфальтовом покрытии и его интенсивному разрушению.

Развитию трещин на стыке откоса и основной площадки будет способствовать специфика сезонного промерзания насыпей. Основной особенностью их сезонного промерзания является направление фронта промерзания преимущественно от основной площадки. Это вызывает формирование значительных (до 20–25 °С/м) градиентов температуры в начальный период промерзания. При таких градиентах температуры в грунтах насыпи возможно образование морозобойных трещин. Направленность фронта промерзания от основной площадки при промерзании насыпных грунтов с большим количеством пылеватой фракции в условиях небольших (от 0.3 до 5.0 °С/м) температурных градиентов на глубине более 3 м в конце сезона охлаждения может привести к развитию субвертикальных сегрегационных ледяных прослоев. При их протаивании формируются вертикальные зоны разуплотнения, по которым происходит спływ и осадка грунтов. Промерзание насыпей происходит, как сверху, так и с боковых поверхностей. Это может приводить к формированию локальных зон напорных вод с последующим развитием бугров пучения, внутригрунтовых и поверхностных наледей, деформирующих, как дорожное полотно, так и тело самих насыпей (рис. 6).



Рис. 6. Бугор пучения на поверхности насыпи [\[9\]](#)

Формирование термокарстовых просадок в зоне, непосредственно примыкающей

к дорожному полотну и частично под его обочиной.

На участках подтопления, где в ряде мест, вследствие перехвата насыпным сооружением поверхностного стока, формируются озера значительных размеров (от первых метров до первых сотен метров). В зависимости от глубины водоема, его линейных размеров, времени существования, состава и льдистости грунтов, образуются термокарстовые просадки различных размеров и интенсивности (рис.7), затрагивающих

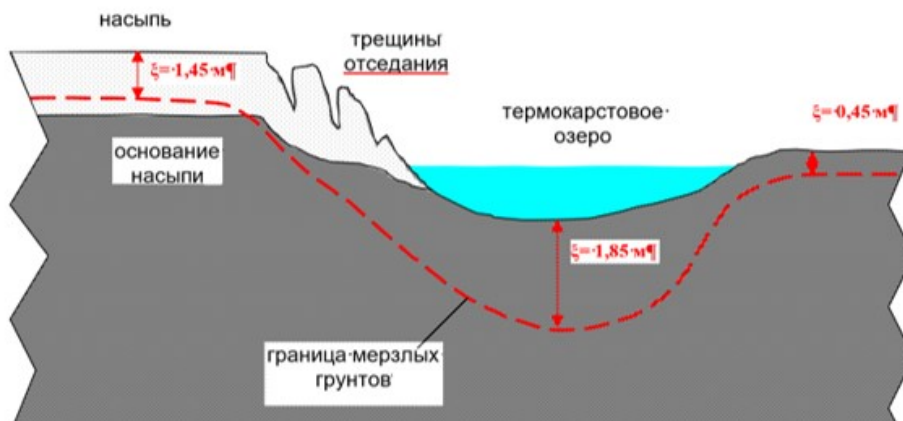


Рис. 7. Развитие термокарста в районе насыпи Ямальской железной дороги на участке подтопления [10].

Напряжения в насыпных грунтах, вызываемые неравномерными осадками основания, приводят к разрушению полотна на автомобильных дорогах. Масштабы термокарстовых просадок, а соответственно, и разрушения насыпи, возрастают с увеличением льдистости приповерхностного горизонта многолетнемерзлых пород (ММП), мощности и времени существования водного покрова и мощности снега в зимний период. Сочетание высокольдистых грунтов в грунтах основания насыпи и подтопления следует считать наиболее неблагоприятным фактором для строительства автомобильных дорог и других насыпных сооружений.

На рис. 8 показаны особенности теплового воздействия автомобильной дороги с цементно-бетонным покрытием (дорога Тазовский – Газ-Сале, Тазовский район Ямало-Ненецкого автономного округа) на месте пересечения полигонального болота [11]. Ширина основания дорожной насыпи – 20 м, дороги – 12 м, высота насыпи – до 2.5 м. Температура ММП для района исследований составляет от -3 до -7 °С. Анализ георадиолокационных данных показал, что основные зоны опускания кровли ММП локализованы в придорожных понижениях. У основания насыпи, наблюдается резкое (до 2 м) понижение кровли ММП, что обусловлено стоком влаги в придорожное понижение, а также вытаиванием полигонально-жильного льда. Непосредственно под дорожной насыпью кровля ММП залегает на глубине до 3 и более метров, то есть многолетнемерзлая кровля находится в пределах естественных глубин залегания, лишь в некоторых местах снижаясь на 0.3 м. Данное положение кровли мерзлых пород соответствует переходному высокотемпературному типу квазистационарного состояния температурного поля [1]. Вероятно, такая специфика залегания кровли ММП обусловлена значительным охлаждением очищаемой от снега дорожной насыпи в зимний период и значительным прогревом песчаных грунтов насыпи летом.

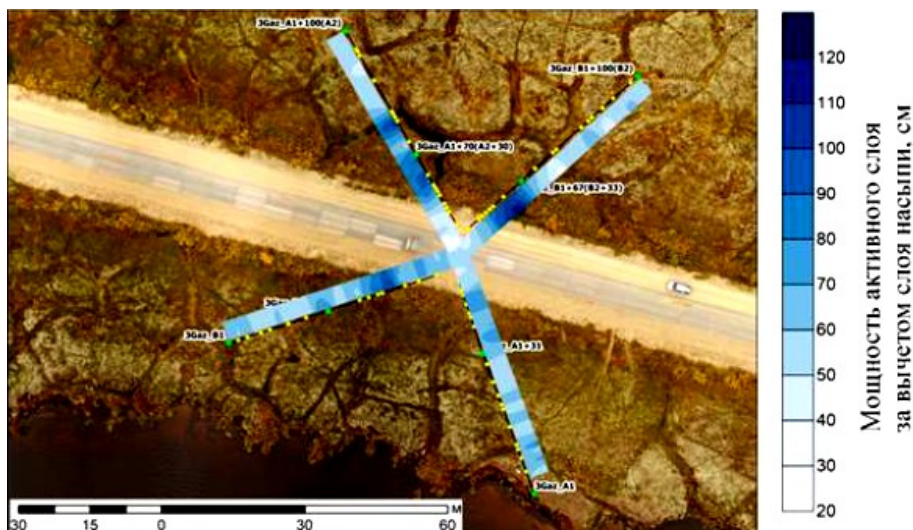


Рис. 8. Изменение глубины залегания кровли ММП по георадиолокационным данным на автодороге Газ-Сале – Тазовский [\[11\]](#)

Формирование слоя несливающейся мерзлоты под дорогой.

В ходе эксплуатации автомобильных дорог в области распространения многолетнемёрзлых пород, особенно в южных районах данной области, когда мощность оттаявших пород превысит мощность промерзающих. В этом случае начинает формироваться «несливающаяся мерзлота». Даже в зимний период между промёрзшим слоем и верхней границей мёрзлых пород постоянно будет существовать талый горизонт, круглогодично оказывающий тепляющее воздействие на подстилающие мёрзлые породы. Кроме того, данный горизонт является каналом перераспределения грунтовых вод, особенно если подстилающие насыпь породы сложены грубозернистым материалом. Обследования проседающих на мерзлоте участков автомобильной дороги «Амур» выявили, что более чем в 90 % случаев имелось наличие воды у оснований откосов дорожной насыпи. В ряде случаев, течение воды осуществлялось вдоль и внутри проседающих участков, в том числе и с фильтрацией через тело насыпи по её основанию. Данные контрольного бурения показали, что глубина протаивания грунтов с поверхности на рассматриваемых участках автомобильной дороги составила на конец августа более 4.5 м. Температура мёрзлых грунтов основания на 1.5–2.0 м ниже границы оттаивания составляла по замерам от -0.1 до -0.2°C (рисунок 4). По данным наблюдений глубина промерзания на данных участках не превышает 4,5 м (рис. 9). [\[12\]](#)

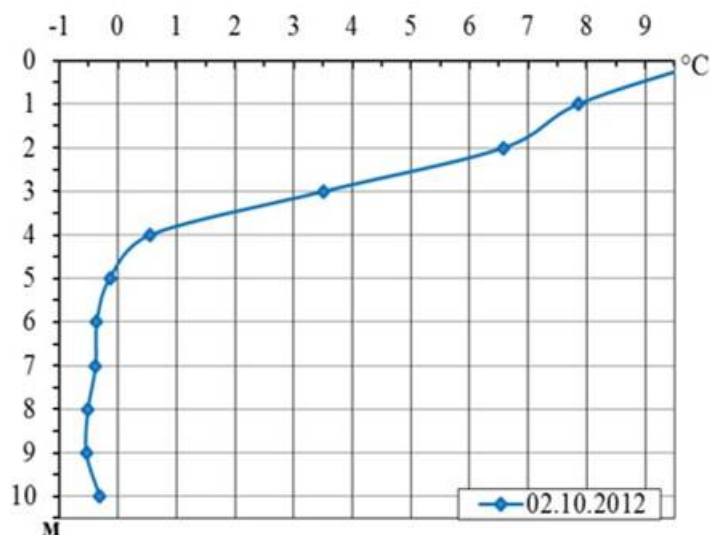


Рис. 9. Распределения температуры грунтов на одном из обследованных аварийных участков [12].

Попадание воды через водопроницаемые грунты нижней части насыпи к мёрзлому основанию вызывает значительное ослабление прочностных характеристик слагающих его грунтов, особенно пылеватых и глинистых, как в прослойках, так и в мелкозёмах заполнителей. При этом постепенно создаётся нарастающее (сверхнормативное) термокарстовое оттаивание за счёт дополнительного, нерасчётного приноса тепла с водой. Также возрастает и тиксотропность, т.е. способность к виброразжижению при динамических воздействиях оттаявших, замоченных и ещё не уплотнившихся грунтов основания. Выполненная работа позволила авторам определить, что основной причиной деформаций на аварийных участках автомобильной дороги «Амур» является «растепление» неустойчивых (высокотемпературных) многолетнемерзлых пород основания [12].

Авторами статьи в 2022 г. изучались мерзлотных условий на 288 километре автомобильной дороги «Амур». Исследования проводились на участке развития интенсивных просадок земляного полотна (рис. 10). Было пробурено 7 скважин глубиной от 10 до 20 м с отбором керна и последующими термометрическими наблюдениями в них. На основании полученных данных построен инженерно-геокриологический профиль (рис. 11). Исследуемый участок дороги расположен на склоне долины реки Олов, в пределах надпойменной террасы. Поверхность ровная, имеющая небольшой уклон в сторону реки, покрыта травянистой растительностью. На поверхности хорошо выражен полигональный рельеф с повторно-жильными льдами. Левый (южный) участок, примыкающий к дороге территории, приподнят относительно правого (северного) (рис. 10, 11). Сброс поверхностных вод осуществляется по водопропускной трубе, проложенной в теле насыпи. В результате проведённых исследований удалось выявить некоторые особенности влияния автомобильной дороги на мерзлотные условия. Рассматриваемая территория находится вблизи южной границы криолитозоны и характеризуется высокими отрицательными температурами. На изученном участке они не опускаются ниже $-0,5^{\circ}\text{C}$, мощность слоя сезонного оттаивания составляет 3,5-4м. Строительство дороги значительно изменило мерзлотные условия.



Рис. 10. Просадки дорожного полотна на участке 288 км автомобильной дороги «Амур». Фото Д. О. Сергеева

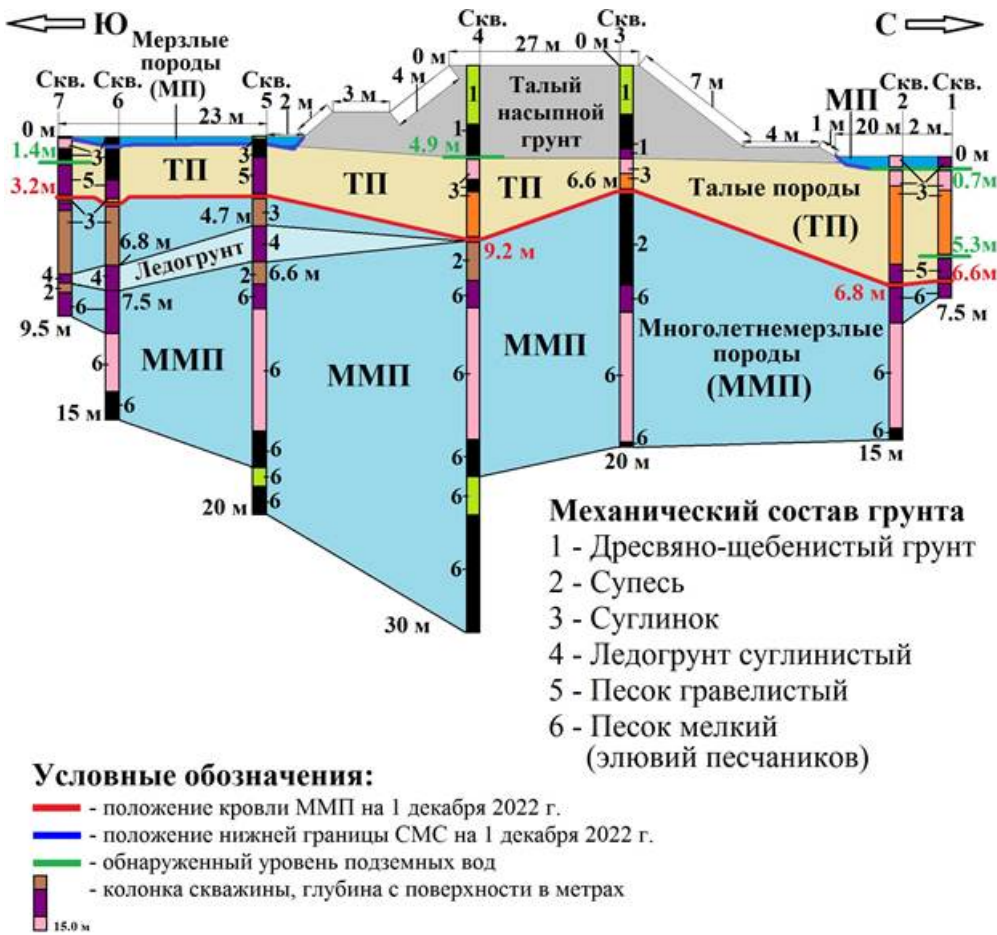


Таблица состояния грунтов

Связанные грунты		Несвязанные грунты
	Твердые	Сухие
	Полутвердые	Маловлажные
	Тугопластичные	Влажные
	Мягкопластичные	Сильнольдистые
	Текучепластичные	
	Текучие	Водонасыщенные

Рис. 11. Инженерно-геокриологический профиль на 288 км автомобильной дороги «Амур» (участок с деформациями дорожного полотна). Составил А. П. Кулаков

Таблица 1. Температуры в скважинах инженерно-геокриологического профиля на 288 км

автомобильной дороги «Амур» (участок с деформациями дорожного полотна). Время проведения буровых работ, декабрь 2023 г.

№ Датчика	Скв. 2	Скв. 3	Скв. 4	Скв. 5	Скв. 6
	Температура °C (глубина м)				
1	-4,27(2)	-8,42(2)	-5,85(2)	-5,51(2)	-3,91(2)
2	-2,75(2,5)	-6,39(2,5)	-4,64(2,5)	-2,62(2,5)	-2,52(2,5)
3	-1,01(3)	-4,08(3)	-3,1(3)	-0,82(3)	-1,03(3)
4	-0,08(3,5)	-1,67(3,5)	-1,5(3,5)	0,01(3,5)	-0,13(3,5)
5	0,01(4)	-0,08(4)	-0,08(4)	-0,09(4)	-0,15(4)
6	0,05(4,5)	0,16(4,5)	0,3(4,5)	-0,19(4,5)	-0,13(4,5)
7	0,07(5)	0,18(5)	0,6(5)	-0,11(5)	-0,23(5)
8	0,03(6)	0,11(6)	0,92(6)	-0,25(6)	-0,29(6)
9	0,03(7)	-0,06(7)	0,75(7)	-0,25(7)	-0,36(7)
10	-0,06(8)	-0,17(8)	0,3(8)	-0,36(8)	-0,36(8)
11	-0,08(9)	-0,19(9)	-0,04(9)	-0,32(9)	-0,36(9)
12	-0,15(10)	-0,23(10)	-0,29(10)	-0,34(10)	-0,38(10)
13	-0,15(12)	-0,3(12)	-0,3(12)	-0,38(12)	-0,3(12)
14	-0,13(14)	-0,31(14)	-0,25(14)	-0,38(14)	-0,4(14)
15	-0,21(15)	-0,32(16)	-0,38(16)	-0,4(16)	-0,38(15)
16		-0,38(18)	-0,28(18)		-0,4(18)
17		-0,36(20)	-0,36(20)		-0,5(20)
18			-0,38(22)		
19			-0,4(24)		
20			-0,42(26)		
21			-0,42(28)		
22			-0,5(30)		

В примыкающей к северной части участка сток воды затруднён. Здесь, вдоль дороги, сформировались поверхностные водоёмы и увлажнённые понижения, начали протавать повторно-жильные льды (рис. 2).



Рис. 12. Увлажнённый северный участок, примыкающий к автомобильной дороге Фото А.П. Кулакова

На южном участке, примыкающем к дороге, активизации экзогенных процессов не наблюдается (рис. 13). Сохраняется первичный растительный покров, отсутствуют, выраженные в рельефе термокарстовые западины и открытые водоёмы.



Рис. 13. Участок, примыкающий к автомобильной дороге с юга.

Фото А.П. Кулакова

Нарушение поверхностного стока и развитие термокарста отразилось на распределение температур в грунтах. На северном, увлажнённом участке положительные температуры грунтов прослеживаются на глубину 8-9м (скв. 2,3). На южном участке оттаивало не более 3-3,5м (скв. 5,6), то есть не превышало мощность деятельного слоя. В распределении температур в грунтах под автомобильной дорогой также наблюдается дифференциация. В скважине пробуренной в южной, более прогреваемой, части насыпи (скв. 4 на рис. 11), грунт оттаял более 8м. На северной части глубина оттаивания составляет около 6м (скв. 3 на рис. 11). Оттаивание мёрзлой породы под насыпью привело к просадкам дорожного полотна, причём его южная часть деформируется интенсивней северной (рис. 10). Этому способствует и вытаивание льдистого горизонта (рис.14), обнаруженного в непосредственной близости от южной части насыпи (скв. 5, рис. 11).



Рис. 14. Керн из льдистого горизонта (скв.5). Фотография Д.О. Сергеева.

Строительство автодороги коренным образом изменило строение мёрзлой толщи. Под сезонномёрзлым слоем сформировался горизонт несливающейся мерзлоты. С момента его возникновения оттаивание мёрзлых пород происходит на протяжении всего года.

Породы данного горизонта как правило имеют пониженные прочностные свойства, они часто переувлажнены, и служат транзитной зоной для грунтовых вод, как в летнее, так и в зимнее время. Направленное оттаивание мёрзлых пород будет продолжаться до полного их оттаивания. В течение этого периода будут наблюдаться деформации различных элементов автомобильной дороги. Тепловое воздействие, оказываемое рассматриваемой ПТС на высокотемпературную мёрзлую толщу приведёт к её полной деградации. Мероприятия по противодействию данному процессу могут лишь ослабить его, но не остановить полностью.

Комплекс опасных процессов

Рассмотренные выше деформации земляного полотна вызываются развитием не одного, а целого комплекса «цепочных» инженерно-геокриологических процессов и явлений. Так в слабо сточных заболоченных днищах речных долин, отличающихся наличием сильно льдистых многолетнемерзлых толщ, причиной развития негативных процессов часто является подтопление нагорной части полосы отвода в результате нарушения поверхностного и внутригрунтового стоков земляным полотном. Образующееся при этом мелкое озеро, хорошо прогреваемое летом, вызывает интенсивное оттаивание многолетнемерзлых пород и тепловые просадки, достигающие нескольких десятков сантиметров. Под озером в течение нескольких лет формируется техногенный талик, а просадки в зоне его влияния постепенно захватывают основания берм. Начинаются просадки берм, а затем и самого земляного полотна. В теле насыпи происходят односторонние просадки с нагорной стороны, сопровождаемые эрозионным размывом и оплыванием тела земляного полотна. Интенсивность термокарстовых процессов и механического деформирования пути часто ежегодно инициируется зимним образованием бугров пучения, внедряющихся в земляное полотно, что способствует развитию оплывин и небольших оползней на откосах. Суммарный эффект развития цепи взаимосвязанных процессов приводит к образованию деформаций, устранить которые подъёмом пути на балласт не удаётся вследствие ежегодного расползания насыпи.

Важный показатель реакции многолетнемерзлых пород на техногенные изменения ландшафтных условий (и соответственно теплообмена) – парагенезис природно-техногенных процессов, который проявляется в том, что в некоторый интервал времени начинают одновременно возникают сразу несколько процессов, каждый из которых, создав на определенном этапе своего развития условия для появления другого, сам при этом не завершается. В силу этого часто происходит усиление негативных эффектов от развития цепи взаимообусловленных процессов. Типичные цепи (ряды) природно-техногенных процессов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Типичные природно-техногенные парагенетические ряды геокриологических процессов [\[13\]](#).

№	Парагенетические ряды
1	Повышение среднегодовой температуры и увеличение глубины сезонного оттаивания пород ® подтопление ® многолетнее оттаивание пород ® тепловая осадка пород (или разжижение пород с приобретением плавунных свойств) ® просадка земной поверхности + суффозия
2	Повышение среднегодовой температуры пород с переходом через 0°C ® многолетнее оттаивание пород ® термокарст ® подтопление + термоэрозия + солифлюкция
3	Подтопление поверхности ® оттаивание многолетнемерзлых пород

	Подтопление поверхности ® оттаивание многолетнемерзлых пород ® изменение уровня режима подземных вод ® морозное пучение пород + наледообразование ® разжижение грунтов при оттаивании ® сплывы
4	Подтопление поверхности ® оттаивание многолетнемерзлых пород ® изменение стока поверхностных и уровня режима грунтовых вод ® термокарст + морозное пучение грунтов + эрозия + суффозия + микросплывы + микрооползни

На участках, где существует потенциальная возможность развития опасных процессов, обычно трудно определить момент, когда опасные проявления суммируются (т.е. возникает синергетический эффект). Это обусловлено вероятностным характером изменения природных факторов, являющихся пусковым механизмом процессов. Однако, учитывая особенности динамики геокриологических условий в различных зонально-региональных обстановках, можно ожидать, что наиболее активно процессы развиваются в условиях морского климата на территории распространения дисперсных льдонасыщенных отложений.

Китайские специалисты, изучая мерзлотные процессы на железной дороге Голмуд-Лхаса, выявили зависимость интенсивности комплекса опасных процессов от высоты насыпи и экспозиции её склонов (рис. 15).

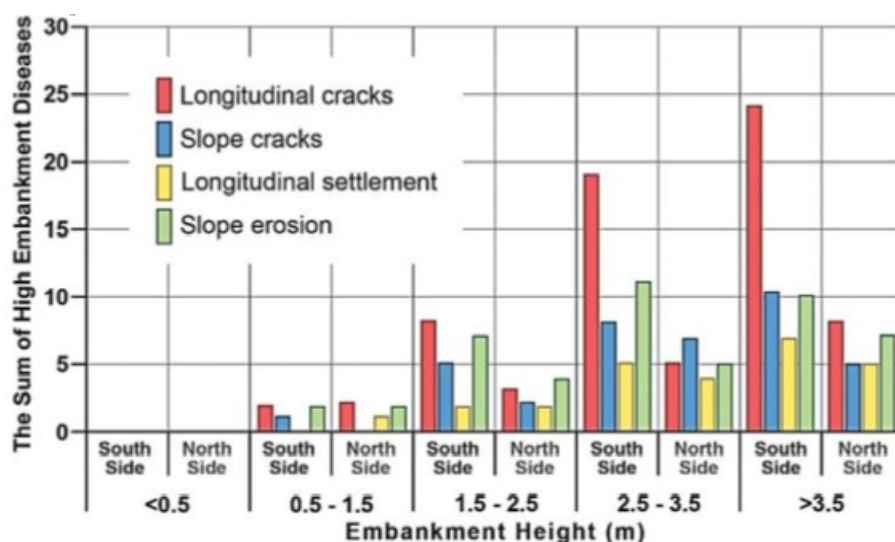


Рис. 15. Комплекс опасных процессов в связи с многолетнемерзлыми породами на дороге Голмуд-Лхаса в зависимости от высоты насыпи в течение первых 30 лет изучения (по Wang): сумма опасных процессов на высокой насыпи (The sum of high embankment diseases), высота насыпи (embankment height), продольные трещины (longitudinal cracks), трещины на склоне (slope cracks), продольная осадка (longitudinal settlement), эрозия склона (slope erosion), северная сторона (north side), южная сторона (south side) [14]

Рассмотренные группы процессов и факторы их обуславливающие действуют на дорожные объекты, расположенные на территориях распространения многолетнемерзлых пород совместно, поэтому результирующий негативный эффект весьма значителен.

Оценка нарушений и восстановительных мероприятий на автомобильных дорогах в условиях многолетнемерзлых пород

Перечисленные выше причины приводят к значительным деформациям инженерных сооружений и нарушают их эксплуатационные характеристики. Следствием является

ежегодное появление значительных по протяжённости участков дорог, требующих ремонта и соответственно возрастание затрат на их восстановление. Рассмотрим это на нескольких примерах.

Трасса автомобильной дороги «Амур» проходит в южной части криолитозоны, характеризующейся высокими температурами многолетнемерзлых пород и глубоким сезонным промерзанием грунтов. В интервью директора ФГУ ДСД «Дальний Восток» Швецова В.А., опубликованного 10.02.2010 г. на сайте Росавтодора отмечается, что уже в год завершения строительства автомобильной дороги «Амур», пролегающие 263 км (12,1%) нуждались в капитальном ремонте, а около 400 км (18,5%) – в реконструкции. В 2012 г количество участков с нарушением дорожного полотна таких мест достигло 313 шт., в 2013г. – 394 шт., в 2014г. – 402 шт., в 2015 – 504 шт., в 2016 – 312 шт. в 2017 – 284 шт. в 2018 – 235 шт, в 2019 г-195 шт. В 2020-2022 гг отремонтировано 27 участков протяжённостью 561,5 км [15]. Формы проявления таких участков различны, это: просадки земляного полотна, оползни и сдвиги, широкие трещины и др. Наибольшую опасность представляют просадки земляного полотна. С момента сдачи в 2010 году всей дороги в эксплуатацию, первые просадки начали появляться на участке, проходящем на территории Забайкальского края, уже в 2011 году (табл. 3).

Таблица 3. Развитие просадок земляного полотна и затраты на их устранение на Забайкальском участке автомобильной дороги «Амур» Чита-Хабаровск, км 0 – км 794 (741+588) в 2011-2013 гг. (по данным ФКУ Упрдор «Забайкалье»)

Год	2011	2012	2013, июль
Количество зафиксированных просадок, шт.	68	327	330
Общая площадь просадок, м ²	-	103159	103960
Площадь устраненных просадок, м ²	Просадки устранялись по гарантиям строителей	40874	12356,6
Затраты на устранения просадок, тыс. руб.		34265	11738,8
Затраты на устранения 1 м ² просадок, руб.	-	838	950

В 2014 году проведены восстановительные работы и устранение просадок в количестве 49 шт., на площади 166,65 тыс. м², протяженностью 19 км, в 2015 - 2016 году 188 шт., протяженностью 52,6 км, в 2017 – 2018 году 20,305 км, в 2018 93,564 км, в 2019 91,69 км. Мониторинг состояния отремонтированных участков показал, что работы по укладке слоя асфальтобетона, кардинально ситуацию не меняют. Попытки обеспечить безопасные условия проезда за счет ремонта покрытия не приносят результата, начавшиеся в основании земляного полотна процессы оттаивания многолетнемерзлых пород продолжаются. Просадки возникают вновь через 2-3 месяца после ремонта.

Проведенное В.И. Гребенцом, В.А. Исаковым обследование автомобильных и железных дорог на участке Норильск - Талнах показало, что деформации полотна в том или ином виде характерны для половины их протяженности. Деформации имеют различные формы и масштабы проявлений и представлены преимущественно осадками земляного полотна, трещинами асфальтового покрытия и обочин автомобильных дорог, эрозией и оседанием откосов насыпей. Примерно на каждые 3 км пути приходится один участок с нарушениями устойчивости, угрожающими безопасности движения. Сравнение результатов проведенного маршрутного обследования автомобильной дороги с материалами (данными) обследования асфальтового покрытия, выполненного в 2007 г., показало, что, несмотря на ремонт, проведенный в 2008 г., количество и площадь

участков деформаций покрытия выросли. Крупные по площади деформации асфальтового покрытия, как правило, были зафиксированы в 2010 и 2011 гг. на тех же участках, что и в 2007 г. Для более мелких деформаций (площадью до 5 м²) такая унаследованность не наблюдается. Исследователи пришли к выводу, что причиной значительных по площади деформаций являются не производственные дефекты при ремонтах, а направленное изменение геотехнической ситуации в основании дорожного полотна [6]. Из обследованных в 2011-2012 гг. 718 км федеральной автомобильной трассы «Колыма» (Р-504) выявлено 37 км, подверженных негативному влиянию криогенных процессов, из которых: 29 км - наледи, 8 км – просадки грунта [16].

Е.А. Бедриным были проанализированы данные по деформациям дорожного полотна некоторых автомобильных и железнодорожных дорог расположенных в криолитозоне. По отчёту дорожного департамента Чукотского АО, к 2000 г. более 60% автомобильных дорог Чукотки нуждались в реконструкции, так как высота их земляного полотна за счёт просадок стала в два раза ниже, чем заложенная по проекту, а 15% находились уже в «нулевых» отметках и, под нагрузкой от автотранспортных средств, продолжали погружаться. Результаты многолетних эксплуатационных обследований (с 70-х годов) аварийных мерзлотных участков БАМа, составляющих к 1990 г. – 3627 мест (в т.ч. 60 в критическом состоянии) на протяжении 2240 км, показали, что дорожные насыпи имели следующие осадки: до 200 мм/год и более (до 500 мм) впервые 18-20 лет эксплуатации; до 40-50 мм/год в последующие годы. В 1992 г. дефектность земляного полотна составила 31% от общей протяжённости трассы БАМа по многолетнемерзлым породам. При освоении нефтяных и газовых месторождений (Уренгойское, Медвежье, Ямбургское, Песцовое, Бованенковское и др.) в зоне многолетнемерзлых пород севера Западной Сибири, наблюдалась быстрое (за 3-4 года), массовое разрушение сборного дорожного покрытия из высокопрочных, армированных железобетонных плит, рассчитанных на 25-летний безремонтный срок эксплуатации. Основной причиной преждевременного массового выхода из строя высокопрочных железобетонных плит, являются эксплуатационные (неравномерные и сверхнормативные) осадки дорожных насыпей [17].

Организация работ по наблюдению за состоянием автомобильных дорог в области распространения многолетнемерзлых пород

Рассмотренные выше криогенные процессы начинают развиваться уже при строительстве автомобильных дорог и продолжаются в процессе их эксплуатации. Они распространены повсеместно, являются основным разрушительным фактором и часто не ликвидируются проводимыми ремонтными работами. Улучшение качества проектно-изыскательских работ и соблюдения рекомендуемых технологий при строительстве незначительно улучшают ситуацию. Комплекс криогенных процессов настолько разнообразен, а синергетические эффекты их взаимодействия настолько велики, что спрогнозировать суммарное деформирующее воздействие на дорожное полотно, в пределах локальных участков, в настоящее время, весьма затруднительно. Отсутствие надлежащей геокриологической информации часто приводит либо к недооценке опасности возможных инженерно-геокриологических процессов и явлений и применению ненадежных технических решений и конструкций элементов дороги, либо, наоборот, к переоценке такой опасности и применению излишне дорогостоящих, длительных по исполнению технических решений и конструкций [18].

В этих условиях наиболее эффективным решением проблемы обеспечения устойчивого функционирования автомобильных дорог на территории распространения многолетнемерзлых пород является создание системы, обеспечивающей своевременное

выявление опасностей и принятие научно обоснованных мер по их устранению. Данная система должна включать в себя ряд процедур и организационных мероприятий, таких как:

- выявление потенциально опасных участков, где разрушение дороги находится в начальной фазе;
- проведение дополнительных инженерно-геокриологических исследований по выявлению опасных процессов;
- разработка проектов по проведению инженерно-восстановительных работ;
- принятие управленческих и финансовых решений по обеспечению восстановительных работ;
- установка контрольной аппаратуры для анализа эффективности проведённых работ;
- создание базы данных, объединяющей все сведения о деформациях, состояниях, свойствах и др., геотехсистем автомобильных дорог, полученные из разных источников и организации информационных потоков между всеми структурными подразделениями, осуществляющими инженерно-геокриологический мониторинг.

Сбор, хранение и распределение информации

Обследование инженерных сооружений и зоны техногенных воздействий служит для оценки состояния инженерных объектов, характеристики интенсивности развития и площадного распространения инженерно-геокриологических процессов и явлений, а также для выбора (назначения) мест проведения стационарных наблюдений. Оно может проводиться дистанционными (аэрофотосъёмка и космическая съёмка, аэровизуальные наблюдения, видеосъёмка) и наземными методами (полевым обследованием инженерных объектов и сопредельных ландшафтов в зоне техногенного влияния). Конструктивные особенности исследуемых инженерных объектов определяют специфику показателей, влияющих на их техническое состояние и подлежащих установлению при обследовании. На автомобильных дорогах это - состояние земляного полотна, наблюдаемые деформации насыпи, характеристика полосы отвода и сопредельных участков. Периодичность и сроки проведения обследования зависят от этапа освоения, установленной динамики техногенных нагрузок и преобладающих видов развивающихся деформаций. В общем случае в период строительства, когда происходит наиболее динамичное изменение геокриологических условий вследствие нарастания техногенных нагрузок и воздействий, часто сопровождающееся развитием опасных деформаций, обследование проводится чаще, также как в начальный период эксплуатации. При этом следует учитывать, что одной из важнейших задач инженерно-геокриологического мониторинга является выявление опасных геодинамических процессов на начальной стадии их развития.

Одним из основных вопросов, при разработке концепции проведения мониторинга ГТС автомобильная дорога - многолетнемёрзлые породы, является выбор способов получения информации об её текущих нарушениях в процессе эксплуатации. Можно выделить два направления: непрерывный автоматизированный (online) мониторинг, и мониторинг на основе периодических инспекций и обследований. При всей привлекательности первого направления (получение прямых измерений в автоматическом режиме с любой необходимой частотой), в его использовании есть один существенный недостаток. Автомобильные дороги, это протяжённые объекты (до

нескольких тысяч километров), пролегающие в разнообразных климатических, геологических, геокриологических и гидрологических условиях. Ландшафтное разнообразие при постоянной техногенной нагрузке, связанной с эксплуатацией автомобильной дороги, приводит к возникновению новых и усилению существующих экзогенных процессов, негативно воздействующих на инженерные сооружения. Если учесть прямые и обратные связи между этими процессами, то их разрушающий эффект может многократно усиливаться. В этих условиях невозможно размещение достаточного количества автоматизированных станций, обеспечивающих необходимый контроль за функционированием автомобильной дороги. В настоящее время устоявшейся общемировой практикой является проведение периодических инспекций и обследований с последующим анализом полученных результатов и, в случае необходимости, выдачей рекомендаций о необходимости осуществления ремонтных или восстановительных мероприятий. При выполнении мониторинга в соответствии с указанным подходом, полученные в ходе инспекций и обследований данные, будут достаточно полно отражать состояние объекта на текущий момент времени и одновременно позволят выявить опасные участки, где необходимы дополнительные исследования. В то же время для контроля технического состояния уникальных и особо сложных сооружений, (мосты, путепроводы уникальные насыпи или выемки) эксплуатирующихся в экстремальных условиях, проведения периодических инспекций может оказаться недостаточным. В этих случаях система мониторинга должна быть непрерывной и автоматизированной.

Система мониторинга технического состояния конструкций автомобильных дорог должна включать в себя ряд основных подсистемы:

- автоматизированный мониторинг наиболее важных объектов, обеспечивающий непрерывное измерение выбранных параметров;
- мониторинг в режиме периодических инспекций и обследований, включающий в себя сбор первичной информации, выделение наиболее опасных участков и организацию их углублённого обследования;
- информационный блок, обеспечивающий сбор, обработку, хранение данных мониторинга и выдачи информации о состоянии объектов автомобильной дороги;
- геодинамическая модель, отображающая изменение состояние ГТС автомобильная дорога (инженерные сооружения подстилающий грунтовый массив) во времени, учитывающая как долгосрочные тенденции, так и краткосрочные локальные воздействия.

Комплекс работ при мониторинге криогенных процессов на автомобильных дорогах

в условиях многолетнемерзлых пород

Инженерно-геокриологический мониторинг осуществляется на участках с интенсивным развитием негативных криогенных процессов или предрасположенных к их развитию. Кроме того, он позволяет выбрать места расположения стационарных постов мониторинга. На стадии эксплуатации автомобильных дорог инженерно-геокриологический мониторинг позволяет регистрировать изменение геокриологических условий, осуществлять прогноз развития неблагоприятных криогенных процессов. Тем самым выявлять опасные участки, где происходят или предполагаются деформации дорожного полотна, насыпи и иных элементов дорожной инфраструктуры. Мониторинг осуществляется в режиме периодических посещений с применением дистанционных и наземных методов, а также на организуемых стационарных постах наблюдений. В

процессе мониторинга выполняются наблюдения за следующими криогенными процессами:

- *Термокарст.* Наблюдения за термокарстом на выявленных потенциально опасных участках развития процесса термокарста, а также на участках развития подземных льдов, организуются с целью обнаружения признаков термокарста и условий, приводящих к его активизации в полосе отвода. Объектами мониторинга являются просадки и поверхностные водоёмы, возникающие на поверхности дорожных конструкций и полосы отвода автомобильной дороги. На участках активного развития термокарстовых процессов проводится измерение глубины и площади западин и термокарстовых озёр, измерение температурного режима воды и донных отложений, измерение скоростей отступления берегов (термоабразия).

- *Морозное пучение грунтов.* Наблюдения на потенциально опасных участках автомобильной дороги организуются с целью обнаружения признаков пучения, определения скорости и амплитуды пучения в зависимости от климатических факторов и техногенного воздействия. Объектами мониторинга являются пучиноопасные участки автомобильной дороги, площадь распространения пучинистых грунтов в верхнем горизонте, их состав и влажность. Наблюдения включают контроль за температурой пород, установку пучиномеров и реперов, повторные геодезические съёмки, лабораторное исследование свойств грунтов.

- *Наледи.* Наблюдения на потенциально наледоопасных участках организуются с целью обнаружения признаков и условий наледообразования в пересекаемых долинах рек и ручьёв и на выходах подземных вод в долинах. Объектом мониторинга являются наледоопасные участки долин на автомобильной дороге, мощность наледных тел, площадь наледных полей, время существования наледи (сезонные и многолетние) и источник их питания (подземные или речные воды).

- *Термоэрозионные процессы.* Наблюдения на участках, подверженных термоэрозионным процессам ведутся с целью определения интенсивности их проявлений. Регулярные наблюдения за возможным размывом пород организуются в пределах полосы отвода. Объекты наблюдения – крутые склоны междуречий и речных долин, возникающие при термоэрозионном размыве промоины, борозды, активно растущие овраги, угрожающие размывом насыпи автомобильной дороги. Исследования включают: выявление вновь образовавшихся эрозионных форм; измерения параметров эрозионных форм (глубина, ширина) с привязкой к реперам; инструментальную съёмку (тахеометрическую, нивелирование и т.п.) для определения величины перемещения вершин эрозионных форм.

- *Курумы.* Объектом мониторинга являются курумоопасные склоны на автомобильной дороге. К методам наблюдений относятся повторные геодезические работы на меченых обломках пород, вскрытие курумных тел шурфами.

- *Солифлюкция.* Наблюдения на участках развития солифлюкции организуются с целью обнаружения признаков смещений грунтов на пересекаемых автомобильной дорогой склонах.

- *Оползневые процессы.* Объектом мониторинга являются оползнеопасные склоны на автомобильной дороге, оползневые тела и их параметры.

- *Обвально-осыпные процессы.* Объектом мониторинга являются обвально-осыпные склоны в пределах полосы отвода автомобильной дороги.

По материалам обследования выделяется 4 группы участков:

- участки ГТС с деформациями конструкций сооружений и с грунтами оснований, поражёнными опасными инженерно-геокриологическими процессами;
- участки зоны техногенных воздействий с активизацией или новообразованием геокриологических процессов, опасных для эксплуатации сооружений;
- участки потенциально опасные, в пределах которых существуют условия для возникновения опасных инженерно-геокриологических процессов;
- прочие участки с относительно благоприятной динамикой природной обстановки.

Организационные решения

Система мониторинга, какой бы совершенной она не была, не может быть эффективно использована без соответствующей организационной системы, включающей:

- эксплуатирующую организацию, в ведение которой находится получение первичной информации из постов автоматизированного мониторинга и в режиме периодических инспекций и направлением её в центр обработки информации, а также принятие решения об организации дополнительных исследований на наиболее опасных участках;
- научную (научно-производственную) организацию, обеспечивающую научное сопровождение мониторинговых работ, разработку рекомендаций по предотвращению или ликвидации негативных процессов, проведение исследований на участках, указанных эксплуатирующей организацией, составление прогноза изменения мерзлотных условий на отремонтированных участках (все материалы исследований направляются в информационный центр);
- проектную организацию, которая на основании имеющейся информации от периодических обследований и данных автоматизированного комплекса, разрабатывает проектное решение для устранения нарушений на выбранных участках;
- информационный центр, куда стекается, обрабатывается и хранится вся полученная.

Проводимые в настоящее время массовые работы по ремонту значительных участков автомобильных дорог, построенных в области распространения многолетнемёрзлых пород, по сути, являются адаптационными. Их цель привести параметры данных сооружений в соответствие с меняющимися геокриологическими условиями. Часто данные работы проводятся без соответствующего научного обеспечения, что снижает их эффективность. Это приводит к увеличению затрат, при этом поставленные цели, как показали рассмотренные выше материалы, не достигаются.

Организациям, занимающимся эксплуатацией автомобильных дорог в области распространения многолетнемёрзлых пород необходимо разработать корпоративную систему комплексных мероприятий, контролирующую взаимовлияние природных геокриологических (в том числе и динамика климата) и техногенных факторов, с целью минимизации возможности возникновения неблагоприятных последствий. Данная система обеспечит разработку адаптационной модели функционирования автомобильных дорог в области распространения многолетнемёрзлых пород, включающей ряд последовательных процедур принятия управленческих решений на всех структурных уровнях. Адаптационная модель предполагает корректировку управленческих решений, а также режима функционирования существующего объекта, направленных на

обеспечение его устойчивой эксплуатации при изменениях ландшафтных и климатических условий. Адаптационные мероприятия включают последовательные процедуры по оценке изменения трансформации многолетнемерзлых пород, прогноз дальнейших климатических изменений и состояния ММП, разработка механической модели и оценка несущей способности пород с учетом изменения их состояния, наконец, принятие организационных решения. Конечной целью адаптационных мероприятий является – обеспечение научной информационной поддержки лицам, принимающим решения для своевременного реагирования на меняющиеся или ожидаемые изменения условий окружающей среды, негативно влияющие на функционирование инфраструктуры автомобильных дорог на территории криолитозоны.

Для планирования и управления адаптацией необходимо решить следующие задачи:

- включать адаптацию в политику развития и планы инвестиций организации осуществляющей эксплуатацию автомобильной дороги;
- определить методику получения и анализа информации о произошедших и ожидаемых региональных изменениях климата и геокриологических условий и о возможных последствиях этих изменений для объектов производственной деятельности;
- определить критерии необходимости проведения адаптационных мероприятий на региональном и объектовом уровнях;
- предложить критерии выбора приоритетных стратегий адаптации на региональном и объектовом уровнях. Эти критерии могут включать соотношение затрат и выгод, критерии надёжности, гибкости и др.;
- определить районы, для которых необходимо формирование региональных адаптационных программ;
- разработать методики и технологические приёмы, используемые для выбора эффективных и максимально экономичных мер по инженерной защите и/или компенсирующим мероприятиям на объектовом уровне;
- разработать систему отчётности и информационного взаимодействия между участниками программ адаптации;
- определить сферы ответственности и полномочий для участников программ адаптации;
- определить ресурсы, необходимые для разработки и реализации программ адаптации;
- определить критерии и показатели эффективности адаптационных программ и мероприятий.

В ходе мониторинга фиксируются изменения ГТС. Причины любых изменений связаны с какими-либо вызывающими их процессами, поэтому важно проследить всю цепочку событий, определяющих негативные изменения на автомобильной дороге. Для этого рассмотрим последовательность этапов взаимодействия технических и природных составляющих при формировании ГТС. На этапе изысканий и проектирования автомобильной дороги выбираются наиболее устойчивые участки, на которых геологическая среда находится в условно квазистационарном состоянии. Для области распространения многолетнемерзлых пород это квазистационарное состояние будет определяться климатическими и ландшафтными условиями. При этом, главными показателями будут температура, мощность, льдистость, мощность деятельного слоя мерзлых пород. Строительство объектов автомобильной дороги (главным образом

полотно автомобильной дороги) вносят существенные изменения, формируя неравновесные условия на границе техногенной и природной компонентов ГТС. Если проектное решение выбрано правильно, то через незначительное время ГТС придёт в квазистационарное состояние. Чаще всего стабилизации не наблюдается, и ГТС автомобильной дороги, а также прилегающие к ней участки начинают трансформироваться и разрушаться. Следует выделять несколько этапов негативного развития ГТС. В области распространения многолетнемёрзлых пород литогенная составляющая имеет отрицательную температуру и содержит лёд. Если данный компонент находится в неравновесном состоянии, будет происходить или понижение температуры или её повышение. Первое приведёт к повышению прочностных свойств грунтов и не несёт опасности для автомобильной дороги. Второе может приводить к повышению температуры до значений фазовых переходов. Пока температуры находятся в области отрицательных значений, активизации термоденудационных процессов не наблюдается. При достижении температуры грунтов области фазовых переходов начинается таяние мёрзлых пород. С этого момента наблюдается развитие комплекса термоденудационных процессов таких как, термокарст, термоэрозия, солифлюкция, термоабразия. В свою очередь, совокупность перечисленных процессов приводит к разрушению дорожных конструкций: просадки дорожного полотна и связанные с ним образование трещин, термоэрозионный размыв насыпи, формирования трещин отседания на склонах насыпи.

Следует выделять нескольких стадий развития процессов разрушающих объекты автомобильной дороги: создание неравновесных условий на границе техногенных объектов автодороги и подстилающих мёрзлых пород; изменение состояния мёрзлого массива (при повышении температуры в области отрицательных значений) с локальными незначительными внешними проявлениями термоденудационных процессов; развитие термоденудационных процессов в рамках допустимых деформаций объектов автомобильной дороги и прилегающих территорий; развитие недопустимых деформаций и разрушений объектов автомобильной дороги и прилегающих территорий. Для каждой стадии необходимо подобрать свой комплекс наблюдений.

Мониторинг соответствия проектных решений и реального взаимодействия технической компоненты с окружающей средой. Он выполняется на основе долговременных комплексных наблюдений, в условиях стационарных наблюдательных пунктах, расположенных на выделенных участках с типичными условиями и направлен на оценку поведения объектов автомобильной дороги в реальных условиях, а также направленности и темпов изменения состояния компонентов природной среды. Наблюдения проводятся на стационарах и в режиме периодических посещений.

Мониторинг участков, где деформаций объектов автомобильной дороги нет, а изменения в полосе отвода уже наблюдаются, наблюдения проводятся в режиме периодических посещений и фиксации изменений.

Мониторинг участков, где наблюдаются деформации объектов автомобильной дороги и в полосе отвода, наблюдения проводятся в режиме проведения специальных инженерно-геологических исследований (геофизика, бурение, термометрия в скважинах и др.).

Создание единой базы данных по всем видам мониторинга.

Внесение в перечень проводимых мероприятий эксплуатирующей организации перечень работ по мониторингу с разработкой регламента и их финансированием.

Внесение в перечень проводимых мероприятий по мониторингу работ по научному сопровождению с привлечением сторонних специализированных организаций с

разработкой регламента данных работ и их финансированию.

Существующий опыт организации инженерно-геологического мониторинга ГТС, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород

В настоящее время в Российской Федерации ряд организаций, успешно применяют системы комплексного инженерно-геокриологического мониторинга. К ним в первую очередь следует отнести и ОАО «Газпром», ПАО «Транснефть» и ряд других. В них работы по сбору и анализу информации разработке проектных и технических решений в рамках геотехнического мониторинга встроены в общую организационную структуру.

Организация геотехнического мониторинга (ГТМ) ОАО «Газпром» отличается комплексностью и системностью. В нем учтены и согласованы между собой технические и управленческие решения, стадии жизненного цикла объектов, иерархичность в организации работ, ранжирование передачи информации, особенности взаимодействия различных подразделений. Рассмотрим некоторые базовые принципы организации мониторинга.

Учёт стадий жизненного цикла объектов

Каждая из стадий жизненного цикла отличается видами, уровнями и интенсивностью техногенного воздействия на природную составляющую ГТС и реакцией многолетнемерзлых пород на эти воздействия. Соответственно будет отличаться и организация информационных потоков. На этапе фоновой оценки природно-геологические особенности территории планируемого размещения инженерных объектов (стадия выполнения проектно-изыскательских работ) в природных, ненарушенных условиях оцениваются на основании результатов инженерно-геологических изысканий, научно-исследовательских, картографических и других работ, ландшафтных исследований. На этапе строительства инженерных объектов изменение инженерно-геологических, геокриологических, гидрологических и других условий фиксируется непосредственно по окончании строительно-монтажных работ.

Начальный этап эксплуатации инженерных сооружений продолжается от 3 до 5 лет в зависимости от глубины произошедших в период строительства изменений и техногенного воздействия на ГТС (видов и глубины техногенных нарушений и прогнозируемой их реакции на данные техногенные нарушения). На этом этапе условно фиксируется временной интервал, по истечении которого резко снижаются последствия строительного периода, и возрастает степень влияния действующего инженерного объекта. Типичные виды воздействия на данном этапе — прямые тепловые, механические, реже — химические нагрузки на толщу ММП, приводящие к нарушению температурного режима грунтов оснований, изменению их деформационно-прочностных свойств и, как правило, к снижению несущей способности.

Этап интенсивной эксплуатации инженерных объектов диагностируется по адаптации геокриологических условий к техногенным возмущениям их состояния и формированию собственно ГТС как единого комплекса и ассоциации природного и инженерного компонентов, взаимодействующих между собой.

Иерархичность в принятии решений

На уровне эксплуатирующих организаций осуществляются мероприятия, направленные на предотвращение и устранение последствий развития опасных экзогенных процессов (термоэрозия, термокарст, солифлюкция и пр.). На уровне научно-исследовательских и

проектных организаций разрабатываются технические решения, направленные на совершенствование технологий и способов строительства и эксплуатации инженерных объектов. На уровне головной организации осуществляется экспертиза, согласовываются и утверждаются технические управляющие решения (ТУР), направленные на обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности инженерных объектов.

Наличие обратной связи

На уровне объекта информация, получаемая при проведении режимных наблюдений, проходит первичную обработку, агрегируется, анализируется на предмет достоверности и передается в службу ГТМ организации. В службе ГТМ происходит корректировка режимов и периодичности проведения наблюдений с последующей передачей информации об изменениях на уровень объекта, где осуществляются технологические изменения.

Ранжирование передачи информации по степени возникновения опасности к объектам и подразделяется на несколько уровней: плановый, оперативный, экстремальный, чрезвычайный.

При плановом характере передачи информации в системе ГТМ периодичность передачи информации определяется проектом и соответствует стандартному режиму функционирования объекта.

В оперативном режиме информация передается на вышестоящие уровни в случае обнаружения развития опасных процессов, выявления (или прогнозирования возникновения) нештатных ситуаций.

При экстремальном режиме, связанном с развитием нештатных ситуаций на инженерных объектах, информация передается немедленно на вышестоящие уровни системы ГТМ, руководству эксплуатирующих организаций,

При чрезвычайном характере возникших ситуаций информации передаётся территориальным и региональным службам системы Министерства по чрезвычайным ситуациям РФ.

ООО «НИИ Транснефть» разработало программный комплекс геоинформационной системы «Мониторинг линейной части магистральных нефтепроводов». Система геотехнического мониторинга предусматривает непрерывный автоматический сбор данных и периодический контроль параметров. Два раза в год специалисты измеряют температуру многолетнемерзлых пород с использованием термометрических скважин, проводят внутритрубную диагностику определения пространственного положения нефтепровода, контроль планово-высотного положения объектов линейной части. Данные меры позволяют повысить точность определения пространственного положения трубопровода, проводить калибровку расчетных моделей по натурным данным и, соответственно, снижать риски возникновения деформаций трубопровода. Также ведется обследование трассы с летательных аппаратов с применением инновационной технологии воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотофотосъемки сверхвысокого разрешения. Результаты измерений и обследований заносятся в информационную базу данных, где систематизируются. Полученные сведения являются основой для проведения комплексного анализа текущего технического состояния объектов нефтепровода и формирования прогноза его изменения при планируемых условиях эксплуатации. ГИС «Мониторинг» позволяет обеспечивать оперативность

принятия управленческих и технических решений, направленных на безаварийную работу магистральных трубопроводов.

Успешное создание системы инженерно-геокриологического мониторинга в рассмотренных организациях обусловлено несколькими причинами. С самого начала к её организации были привлечены ведущие научные организации, имеющие богатый опыт исследования мёрзлых пород. Комплексные системы мониторинга создавались, как корпоративные подразделения и были встроены в общую информационную и управленческую структуру организаций. Это позволило объединить сбор информации её обработку, накопление, научное сопровождение с финансово-управленческими решениями.

В отношении автомобильных дорог ситуация отличается. Построено уже тысячи километров дорог на территории Забайкалья, Западной и Восточной Сибири, Таймыра. Практика показала, что с начала эксплуатации и в последующие годы дорожные сооружения начали повсеместно деформироваться и разрушаться, особенно на территориях у южной границы криолитозоны. Резко возросший объем строительства дорог с твёрдым покрытием на территориях распространения многолетнемёрзлых пород не сопровождается соответствующим научными и организационными мероприятиями. Для ускорения разработке системы мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территории распространения многолетнемёрзлых пород совершенно необходимо учитывать имеющийся в стране опыт проведения подобных работ.

Заключение

В настоящее время наблюдается существенный разрыв между происходящим интенсивным строительством автомобильных дорог в Арктической зоне РФ и соответствующей нормативной базы, учитывающей специфику взаимодействия инженерных сооружений и мёрзлых пород. Это касается в первую очередь нормативов, регламентирующих проведение инженерно-геокриологического мониторинга. Наблюдаемые масштабные деформации земляного полотна, на различных автомобильных дорогах, эксплуатируемых в области распространения многолетнемёрзлых пород, связаны не только с недочётами изыскателей, недоделками строителей, или ошибками проектировщиков. Они отражают комплекс проблем, возникающих при взаимодействии естественных и техногенных компонентов сформированных ГТС. Различные сочетания мерзлотных условий и применяемых технических решений обуславливает многообразие проявлений криогенных процессов, негативно влияющих на функционирование дорожных объектов. Инженерно-геокриологический мониторинг автомобильных дорог в области распространения многолетнемёрзлых пород необходимо осуществлять на основании комплексной программы, включающей в себя технологические, научно-методические, управленческие, и другие мероприятия. Система мониторинга, какой бы совершенной она не была, не может быть эффективно использована без соответствующей организационной структуры, включающей:

- эксплуатирующую организацию, в ведение которой находится получение первичной информации с постов автоматизированного мониторинга и в режиме периодических инспекций и направлением её в центр обработки информации,
- информационный центр, куда стекается, обрабатывается, хранится и распределяется между другими подразделениями вся полученная информация;
- научную (научно-производственную) организацию, обеспечивающую научное сопровождение мониторинговых работ, разработку рекомендаций по предотвращению

или ликвидации негативных процессов, проведение исследований на участках, указанных эксплуатирующей организацией, составление прогноза изменения мерзлотных условий на отремонтированных участках;

– проектную организацию, которая на основании имеющейся информации, полученной при периодических обследованиях, данных автоматизированного комплекса и материалов, полученных при дополнительных исследованиях, разрабатывает проектное решение для устранения нарушений на выбранных участках;

- центр принятия решений по выделению приоритетов в направлении работ и их финансированию.

В Российской Федерации, в ряде организаций, имеется положительный опыт создания успешно функционирующих нормативов по проведению инженерно-геокриологического мониторинга, который с учётом специфики ГТС автомобильных дорог можно было бы использовать.

Библиография

1. Исаков В.А. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ В ОСНОВАНИЯХ ДОРОГ НА ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ // ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 5. ГЕОГРАФИЯ. 2015. № 3. С. 25-34.
2. Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ НА ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОГЕ Р504 «КОЛЫМА» (ЯКУТСКИЙ УЧАСТОК) // Геоинформатика. 2020. №
3. С. 46-52. 3. Маслов А.Д. Основы геокриологии: учебное пособие / А.Д. Маслов, Г.Г. Осадчая, Н.В. Тумель, Н.А. Шполянская. Ухта: Институт управления, информации и бизнеса; 2005.
4. Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Мониторинг изменений рельефа полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное – Тазовский // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 68. 2022. № 4. С. 384-405. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.
5. Тихонравов А. В. Особенности строения полигонально-жильных льдов севера Гыданского полуострова и Пур-Тазовского междуречья / Автореферат дис. ... кандидата геолого-минералогических наук. Якутск, 2019. 23 с.
6. Гребенец В. И., Исаков В. А. ДЕФОРМАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ НА УЧАСТКЕ НОРИЛЬСКО-ТАЛНАХ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМИ // Криосфера Земли. т. XX. 2016. № 2. С. 69-77.
7. Кондратьев С. В. Деформации Забайкальской части федеральной автомобильной дороги «Амур» Чита – Хабаровск на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов: причины и пути решения проблемы (на примере перехода через руч. Чичон) / Автореферат к.г.н. Иркутск. Институте земной коры. 2016. 22 с.
8. Исаков В. Основные типы и причины развития деформаций на автомобильных и железных дорогах в Норильском промышленном районе // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том 3. Тюмень. 2012. С. 207-211.
9. Богданов А.И., Квашук С.В. Анализ работы железнодорожного пути в условиях слабосточных марей и высокотемпературной мерзлоты (на примере района обхода Бурейского водохранилища) // Арктика и Антарктика. 2022. № 1. С. 95-108. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.1.37649
10. Комплексное обследование состояния внутрипромысловых автодорог Бованенковского и Харасавэйского ГКМ. Научно-технический отчет ООО Научно-

производственное предприятие "ГЕОСИСТЕМ" 2003г.

11. Каверин Д.А., Судакова М.С., Хомутов А.В., Хайруллин Р.Р., Факашук Н.Ю., Пастухов А.В. Применение георадиолокации для оценки влияния автодороги на глубину залегания многолетнемерзлых пород в полигональных болотах Севера Западной Сибири // Арктика и Антарктика. 2022. № 2. С. 1-12. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.2.37964 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=37964
12. Бедрин Е. А., Дубенков А. А. АНАЛИЗ ПРИЧИН СВЕРХНОРМАТИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МЕРЗЛОТЫ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ «АМУР») // Вестник СибАДИ, выпуск 3 (37). 2014. С. 48-51. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=37649
13. Разработка технологического регламента на сооружения экспериментальных участков и проведение геотехнического мониторинга при строительстве новой железнодорожной линии Обская – Бованенково. Отчет по договору № 2/08. ООО"ПНИИС – Изыскания. М.: 2008. 119 с.
14. Харрис С. А. Геокриология. Характеристики и использование вечной мерзлоты. Т. II / С. А. Харрис, А. В. Брушков, Чэн Годун. М.: Берлин: Директ-Медиа. 2020. 362 с.
15. URL: <http://xn--90aecdnbadn7basfee.xn--p1ai> (дата обращения 24.08. 2023)
16. Гулый С. А., Прелль Н. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПРИЧИН НЕКОТОРЫХ КРИОГЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ФЕДЕРАЛЬНОЙ ТРАССЕ Р-504 "КОЛЫМА" // Вестник МАДИ, вып. 3 (34), 2013
17. Бедрин Е. А. Определение направлений по обеспечению устойчивости земляного полотна дорог в зоне вечной мерзлоты // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2011. Вып.2 (20) С. 15-21.
18. Кондратьев В. Г., Кондратьев С. В. ЗАЩИТА ФЕДЕРАЛЬНОЙ ДОРОГИ «АМУР» (ЧИТА – ХАБАРОВСК) ОТ ОПАСНЫХ ИНЖЕНЕРНОГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ // Инженерная геология. 2013. №5, С. 40-47.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, особенности организации инженерно-геокриологического мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территориях распространения многолетнемерзлых пород.

Методология исследования, в статье не указаны, но исходя из анализа статьи можно сделать вывод о использовании картографического метода с элементами дистанционного зондирования, методов анализа состава почв и мерзлых породах, а также анализ литературных данных. Судя по иллюстративным материалу автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о гинезисе и геоморфологических особенностях на территориях распространения многолетнемерзлых пород где построены тысячи километров современных автомобильных дорог с твердым покрытием. Существующие методы проектирования, строительства и эксплуатации не обеспечивают необходимых параметров надежности и безопасности функционирования данных инженерных сооружений. Разрушения

продолжаются в процессе с неоднократным повторением и после проведения ремонтных работ во всех регионах России (Западная Сибирь, Таймыр, Якутия, Забайкалье). с различными геофизиологическими условиями. Исследования автора статьи помогают понять механизм реакции на изменение погодных-климатических условий и эксплуатацию транспортных путей.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделать вывод о комплексе проблем, возникающих при взаимодействии естественных и техногенных компонентов сформированных особой геотехнической системой. Делается вывод различных сочетаниях мерзлотных условий и применяемых технических решений обуславливает многообразие проявлений криогенных процессов, негативно влияющих на функционирование дорожных объектов.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс деформации в почве и грунтах. Автором подробно изучены с начала эксплуатации и в последующие годы дорожные сооружения с повсеместной деформацией, особенно на территориях у южной границы криолитозоны. Для ускорения разработке системы мониторинга автомобильных дорог, эксплуатируемых на территории распространения многолетнемерзлых пород совершенно необходимо учитывать имеющийся в стране опыт проведения подобных работ, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Статья богато иллюстрирована разнообразными визуализированными формами информации от таблицы и графиков до схем и фотографий.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по имеющемуся положительному опыту создания успешно функционирующих нормативов по проведению инженерно-геофизиологического мониторинга, который с учётом специфики ГТС автомобильных дорог.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.