

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.248.1

ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

© 2023 г. А. А. Горбунова^{1,*}, Г. З. Зарипова^{1,**}, В. С. Исаев^{2,***}, В. Н. Манский^{1,****},
Р. В. Соби́н^{1,*****}, Д. О. Сергеев^{3,*****}, А. П. Безделова^{1,*****}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

²Научный Центр Изучения Арктики,
ул. Республики, 20, Салехард, 629007, Россия,

³Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия

*E-mail: gorbunova.alina2000@yandex.ru

**E-mail: guzel.zaripova1998@yandex.ru

***E-mail: vsisaev@yanao.ru

****E-mail: parhelia1997@gmail.com

*****E-mail: rsobin@yandex.ru

*****E-mail: cryo@geoenv.ru

*****E-mail: abezdelova@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2023 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

В результате мониторинговых наблюдений установлено, что повторяемость просадок на разных участках насыпи Северной железной дороги на перегоне Песец-Хановой в разные годы сопряжена с разными инженерно-геологическими условиями и ведущими криогенными процессами. Для выработки стратегии инженерной защиты трассе железной дороги требуется проведение специально-геокриологического районирования территории, прилегающей к ней. Предложены критерии ранжирования участков с просадками насыпи по степени их опасности, которые разделены по пространственному и временному признакам. Выявлено, что долговременные изменения климата приводят к фоновому изменению геокриологических условий (прежде всего температурного режима горных пород), а экстремальные климатические события и переменные техногенные нагрузки вызывают активизацию или затухание криогенных процессов.

Ключевые слова: криогенные явления, тундра, изменения климата, термическая просадка

DOI: 10.31857/S0869780923020054, **EDN:** TWJZJD

Опыт строительства и эксплуатации автомобильных и железных дорог в условиях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) показывает, что причины деформаций земляного полотна железной дороги обнаруживаются не только в насыпи и ее основании, но и в зоне ее влияния на окружающий ландшафт [13, 16].

Основными деформациями земляного полотна являются: неконтролируемые просадки и неравномерные осадки оттаивания, расползание насыпи, оползание обочин и откосов, разрушение откосов под влиянием термоэрозии, морозного пучения, наледеобразование и солифлюкция

на пологих склонах вдоль дороги [4, 15]. Для недопущения этих явлений или минимизации их влияния должны выполняться специальные обследования, которые обеспечивали бы выявление ведущего процесса и обоснование инженерной защиты [5]. Однако разового (однократного) обследования бывает недостаточно для такой диагностики. Поэтому авторы считают важным организацию комплексного мониторинга на участках с повторными деформациями. В России разрабатываются работы по организации фонового и геотехнического мониторинга в импактных зонах геориска [12]. Эта деятельность предусматривает

организацию стационарных мониторинговых автоматизированных постов и проведение регулярных дистанционных наблюдений.

В последнее десятилетие отмечается ускорение процессов деформации автомобильных и железных дорог в криолитозоне. Это свидетельствует об активной динамике изменения состояния ММП, как в основании данных сооружений, так и в целом. Для обоснованного выбора методов инженерной защиты с учетом тенденций развития криогенных процессов должны решаться прогнозные задачи [7].

Цель статьи – изучение факторов и закономерностей проявления опасных геологических процессов, развивающихся при эксплуатации железных дорог в области распространения ММП в условиях изменяющегося климата и разработка подходов специального геокриологического районирования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главным методом изучения факторов и закономерностей проявления опасных геологических процессов в области распространения ММП в условиях изменяющегося климата при эксплуатации железных дорог является специальное геокриологическое районирование. Такое районирование опирается на результаты исследования ключевых участков, в предлагаемой статье – на данные, полученные на ключевом участке “Хановой” [14, 6, 3].

Мерзлотная съемка позволяет выделить основные типы местности по особенностям условий теплообмена через поверхность и криолитологического строения [5]. Маршрутное обследование заданного участка железной дороги включает в себя визуальный осмотр состояния насыпи и конструкций железной дороги и прилегающей инфраструктуры. Эта часть работ позволяет выделить участки нарушений, которые сопоставляются с типами местности, прилегающими к насыпи в полосе шириной не менее 1 км. При этом осуществляются геокриологические, геологические, геоморфологические, геоботанические, гидрогеологические и гидрологические наблюдения, позволяющие провести предварительную диагностику ведущего процесса, воздействующего на дорогу.

Попикетное описание состояния земляного полотна проводилось раз в год в сентябре на всем протяжении исследуемого участка. По результатам исследований составлялась ведомость неблагоприятных участков дороги, на каждом из которых выполнялись следующие работы:

– определение геометрических характеристик земляного полотна по поперечникам через него;

– определение состояния берм (характер поверхности, высота, вид наблюдаемых деформаций) и водоотводных сооружений (поперечный профиль и продольный уклон, который не должен быть менее 0.004);

– описание признаков деформирования пути (плановые и вертикальные деформации рельсово-шпальной решетки, свежие подсыпки дренирующего грунта на балластной призме и подсыпки грунта на откосах земляного полотна, “выплески” разжиженного тонкодисперсного грунта между шпалами, оплывины на откосах насыпи).

Заметим, что ремонт пути проводится нерегулярно, и отсутствие точной информации о нем не дает однозначных данных о суммарной многолетней величине просадок насыпи. Поэтому каждый год описание просадки делалось без оглядки на предыдущие наблюдения.

Проводилось описание состояния полосы отвода дороги по поперечникам в крест линии пути на участках с нарушениями устойчивости насыпи. При этом фиксировались:

– растительные сообщества и характер их взаимных переходов вдоль поперечника;

– следы техногенных нарушений ландшафтов (в том числе колеи от движения транспорта);

– участки подтопления и затопления поверхности;

– высыпки техногенного грунта;

– формы микрорельфа, обусловленные проявлениями геокриологических процессов;

– наблюдения за глубиной оттаивания пород в полосе отвода по поперечнику через насыпь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Наземное обследование 10-километрового участка Северной железной дороги между станциями Песец и Хановой проводилось в 2017, 2021 и 2022 г. для определения причин деформаций конструкций железнодорожного пути, выявления ареалов развития криогенных процессов и явлений в земляном полотне, а также для наблюдений за техногенными изменениями окружающих природных ландшафтов, которые могут стать причинами развития процессов деформирования дороги в будущем.

Выделены основные типы деформаций железнодорожного полотна.

Первый тип: сопряженные малоамплитудные пучины и просадки, образующие “волнистость” пути с вертикальными амплитудами до 0.3 м и длиной волны 50–150 м. Они могут быть следствием инъекционного и миграционного морозного пучения при промерзании обводненных пород в несквозных таликах и ваннах глубокого оттаивания, образовавшихся в основании земля-



Рис. 1. Серия малоамплитудных просадок первого типа, сформировавшихся предположительно в результате неравномерного оттаивания льдистых грунтов (2022 г.).



Рис. 2. Высокоамплитудная просадка второго типа, сформировавшаяся предположительно в результате оттаивания льдистых грунтов на границе блока-бугра (2022 г.).

ного полотна. Также сопряженные волнообразные просадки земляного полотна могут быть связаны с оттаиванием маломощных полигонально-жильных льдов в пределах мерзлых блоков-бугров (рис. 1).

Второй тип: единичные крупные просадки земляного полотна, которые образовались в результате оттаивания льдистых грунтов. Их глуби-

на составляет 0.2–1.0 м при протяженности вдоль пути от 30 до 300 м и более (рис. 2).

Третий тип: единичные крупные просадки земляного полотна на талых участках, которые образовались в результате объемных деформаций ранее оттаявших грунтов. Их глубина составляет 0.2–1.0 м при протяженности вдоль пути от 30 до 300 м и более (рис. 3).



Рис. 3. Высокоамплитудная протяженная просадка третьего типа (на заднем плане), сформировавшаяся по высокой насыпи на пересечении железной дороги с водотоком над таликовой зоной; на переднем плане — малоамплитудная просадка первого типа на участке примыкания насыпи к блоку-бугру (2022 г.).

На Северной железной дороге, в пределах области развития ММП, преобладают сопряженные малоамплитудные пучины и просадки первого типа, а также термокарстовые просадки земляного полотна, хотя возможны также эрозионный бороздчатый размыв и микрооползни на откосах насыпи.

По материалам попутного описания земляного полотна проведена качественная оценка его состояния на основе анализа протекающих инженерно-геокриологических процессов и мерзлотно-грунтовой обстановки в грунтах земляного полотна, основания и в полосе отвода железной дороги.

Данные, полученные в результате обследования, занесены в таблицы оценки геокриологической опасности (табл. 1).

Оценка опасности складывается из двух групп независимых показателей — пространственной и временной. К пространственным показателям относятся:

- протяженность участка с деформациями (чем он длиннее, тем ситуация хуже);
- глубина просадки (чем глубже и короче протяженность просадки, тем ситуация хуже).

Оцениваемый участок земляного полотна на карте помечался специальным знаком «опасные» (аналог красного светофора), если глубина или протяженность росла со временем или если глубина была больше 0.5 м при протяженности меньше 100 м. Если величины просадок оказывались меньше, то оцениваемый участок помечался вторым специальным знаком — «умеренно опасные» (аналог оранжевого светофора). Если каких-либо геометрических данных не указано, то оцениваемый участок помечался третьим специальным

знаком — «малоопасные» (аналог желтого светофора).

К временным показателям относятся:

- актуальность просадки (просадки 2022 г. «хуже» произошедших ранее) и ее повторяемость (чем выше повторяемость просадки, тем ситуация «хуже»),
- примыкание насыпи к участкам с заведомо неблагоприятными условиями (льдистый грунт, нарушения естественного стока у подножья насыпи, проявление криогенных, склоновых и эрозионных процессов, снижение несущей способности грунта при переувлажнении).

Приведенная на рис. 4 карта-схема геокриологических опасностей участка Северной железной дороги составлена с учетом обновления предыдущих вариантов районирования и позволяет сопоставить характеристики нарушений насыпи железнодорожного пути с условиями развития криогенных процессов по времени [2].

Оцениваемый участок земляного полотна на карте помечался специальным знаком — «опасные» (аналог красного светофора), если просадка повторялась многократно при примыкании к участкам насыпи с заведомо неблагоприятными условиями. Вторым специальным знаком — «умеренно опасные» (аналог оранжевого светофора), — помечались просадки 2022 г. при примыкании к участкам насыпи с заведомо неблагоприятными условиями. Третьим специальным знаком — «малоопасные» (аналог желтого светофора), — помечались исторические просадки, произошедшие ранее 2022 г.

Таблица 1. Характеристика просадок насыпи железной дороги (н/д – “нет данных”)

Номер участка с просадкой (см. рис. 4)	Неблагоприятные условия в окрестности насыпи	Размер просадки		Число лет активности просадки	Опасность просадки
		глубина (по годам)	протяженность (по годам)		
1	Заболоченные участки	2021 г. – 0.4 м 2022 г. – 0.3 м	2021 г. – 100 м 2022 г. – 100 м	2	Умеренно опасная
2	Мерзлые блоки-бугры	н/д	2021 г. – 60 м	1	Малоопасная
3	—	н/д	2021 г. – 8 м	1	Малоопасная
4	Термокарстовое озеро справа от полотна ж/д, минеральные бугры; полоса стока без водо-пропуска	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.5 м 2022 г. – 0.6 м	2017 г. – 100 м 2021 г. – 120 м 2022 г. – 100 м	3	Опасная
5	Концентрация стока (рядом с водопропуском)	2021 г. – 0.3 м 2022 г. – 0.4 м	2021 г. – 100 м 2022 г. – 100 м	2	Опасная
6	Термокарстовое озеро	2020 г. – 0.3 м 2021 г. – н/д 2022 г. – 0.5 м	2020 г. – н/д 2021 г. – 170 м 2022 г. – 100 м	3	Опасная
7	Термокарстовое озеро	н/д	2017 г. – 100 м	1	Малоопасная
8	Концентрация стока (водо-пропуска нет)	2021 г. – 0.5 м 2022 г. – 0.4 м	2021 г. – 40 м 2022 г. – 50 м	2	Опасная
9	С обеих сторон насыпи приле-гают мерзлые блоки-бугры; термокарстовое озеро	2017 г. – н/д 2022 г. – 0.3 м	2017 г. – 110 м 2022 г. – 60 м	2	Умеренно опасная
10	Рядом водопропуск ручья; грунты основания тиксотропные	2021 г. – 0.4 м 2022 г. – 1.2 м	2021 г. – 40 м 2022 г. – 250 м	2	Опасная
11	Мерзлые блоки-бугры	2022 г. – 0.3 м	2022 г. – 50 м	1	Умеренно опасная
12	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.4 м	2021 г. – 50 м	1	Умеренно опасная
13	С обеих сторон насыпи приле-гают мерзлые блоки-бугры	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.3 м 2022 г. – 0.4 м	2017 г. – 300 м 2021 г. – 30 м 2022 г. – 60 м	3	Опасная
14	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.2 м	2021 г. – 30 м	1	Умеренно опасная
15	Мерзлый блок-бугор; в 100 м – водопропуска	н/д	2017 г. – 30 м	1	Малоопасная
16	Мерзлые блоки-бугры	2017 г. – н/д 2021 г. – 0.65 м; 2022 г. – 0.3 м	2017 г. – 110 м 2021 г. – 40 м 2022 г. – 40 м	3	Умеренно опасная
17	Термокарстовое озеро	2017 и 2021 г. – н/д; 2022 г. – 0.3 м	2017 г. – 30 м 2021 г. – 35 м; 2022 г. – 50 м	3	Опасная
18	Водопропуск в 70 м; термокар-стовое озеро	2021 г. – 0.4 м	2021 г. – 40 м	1	Умеренно опасная
19	Термокарстовое озеро	н/д	2021 г. – 40 м	1	Малоопасная
20	В 15 м от водопропуска	2021 г. – 0.3 м	2021 г. – 120 м	1	Малоопасная
21	—	2022 г. – 0.3 м	2022 г. – 30 м	1	Умеренно опасная
22	Мерзлые блоки-бугры	н/д	2021 г. – 30 м	1	Малоопасная
23	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. – 0.2 м 2022 г. – 0.5 м	2021 г. – 300 м 2022 г. – 110 м	2	Опасная
24	Водопропуск в 50 м	2021 г. – 0.05 м	2021 г. – 20 м	1	Умеренно опасная

Таблица 1. Окончание

Номер участка с просадкой (см. рис. 4)	Неблагоприятные условия в окрестности насыпи	Размер просадки		Число лет активности просадки	Опасность просадки
		глубина (по годам)	протяженность (по годам)		
25	Термокарстовое озеро	2017 г. — н/д 2021 г. — 0.1 м 2022 г. — 0.4 м	2017 г. — 70 м 2021 г. — 60 м 2022 г. — 50 м	3	Опасная
26	Мерзлые блоки-бугры и термокарстовое озеро	н/д	2017 г. — 130 м	1	Малоопасная
27	Водопропуск в 20 м	2017 г. — н/д 2022 г. — 0.04 м	2017 г. — 20 м 2022 г. — 160 м	2	Умеренно опасная
28	Термокарстовое озеро	н/д	2017 г. — 15 м	1	Малоопасная
29	Над водопропуском	2017 г. — н/д 2021 г. — 0.2 м 2022 г. — 0.7 м	2017 г. — 20 м 2021 г. — 180 м 2022 г. — 90 м	3	Опасная
30	Мерзлые блоки-бугры и термокарстовое озеро	н/д	2017 г. — 100 м	1	Малоопасная
31	Термокарстовое озеро	2022 г. — 0.4 м	2022 г. — 110 м	1	Умеренно опасная
32	Мерзлые блоки-бугры	2021 г. — 0.2 м	2021 г. — 360 м	1	Умеренно опасная
33	Мерзлые блоки-бугры	н/д	2017 г. — 110 м	1	Малоопасная
34	В 100 м от водопропуска	н/д	2017 г. — 50 м	1	Малоопасная
35	Над водопропуском	н/д	2017 г. — 55 м	1	Малоопасная

ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство ж/д линии Инта—Воркута и ее последующая эксплуатация вызвали существенные изменения мерзлотной обстановки. Это обусловлено нарушением теплообмена поверхности земли с атмосферой на участках, прилегающих к насыпи железной дороги.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на температурный режим и устойчивость насыпи в данном районе.

Снегонакопление. Насыпь, как положительная форма рельефа, оказывает существенное влияние на снегонакопление в условиях выраженного метелевого переноса снега. Поскольку снежный покров в данных природных условиях — один из основных температурообразующих факторов, то его необходимо обязательно учитывать. Кроме того, необходимо учитывать экспозицию откоса (на южных участках оттаивание выше).

Режим надмерзлотных вод сезонно-талого слоя (СТС). Рассматриваемый участок расположен на слабонаклонной поверхности, поэтому в дренажных канавах вдоль дороги аккумулируется поверхностный сток с вышележащего склона. Под действием статической и динамической нагрузки насыпи происходит снижение фильтрационной способности грунтов в ее основании. Дорожная насыпь, таким образом, создает преграду на пути фильтрующихся надмерзлотных вод. Чем более

интенсивным будет сток на участке насыпи, тем больше будет воды у насыпи за счет барражного эффекта, что может приводить в южных регионах криолитозоны к дополнительному оттаиванию ММП.

Тепловое влияние инфильтрации летних дождевых осадков. Наблюдения показали, что в годы с жарким дождливым летом на данном участке просадки насыпи увеличиваются. Избыточное количество влаги, скапливающееся у подножья насыпи и на прилегающих к ней территориях в результате ухудшения условий стока, увеличения прихода атмосферных осадков и снижения транспирации, может вызвать повышение уровня грунтовых вод вплоть до поверхности земли. Все это приводит к заболачиванию и появлению подпрудных озер (которые превращаются со временем в термокарстовые), которые были зафиксированы при маршрутных наблюдениях на участке между станциями Хановой и Песец.

Водотоки. Рядом с водопропускными сооружениями также наблюдались деформации. Как показали данные геофизических исследований, у большинства водотоков формируется таликовая зона мощностью от 2 до 10 м.

Постепенное “фоновое” оттаивание ММП, наблюдающееся на протяжении последнего столетия, создало условия для высокой реактивности геокриологических условий при техногенных нагрузках. При этом аномальные погодные усло-



Рис. 4. Карта-схема опасности просадок участка Северной железной дороги (составители А.А. Горбунова, Г.З. Зари-пова, В.Н. Манский, В.С. Исаев, Д.О. Сергеев).

вия (теплые летние сезоны или холодные зимы) существенно влияют на проявления криогенных процессов. Так, эксплуатационные службы отмечали активизацию просадок в 1953, 1959, 1966, 1968 и в 2008 г. Холодные зимы (например, зима 2020–2021 гг.) притормаживают этот процесс, но благоприятствуют формированию пучин.

В результате анализа данных можно сделать вывод, что осадки при оттаивании не являются единственной причиной деформации железнодорожного полотна, так как в данном районе распространены преимущественно эпикриогенные грунты, которые не обладают высокой льдистостью. Экспериментальные исследования по определению деформационных характеристик оттаивающих грунтов не проводились. Однако осадки оценивались по регрессионной формуле, предложенной на основе обобщения данных испытаний грунтов на севере Европейской части и Западной Сибири [11]. Осадки при влажности суглинка 25–35% составляют от 7 до 11 см при оттаивании 1 м мерзлого грунта. Таким образом, требуется рассмотреть и другие процессы, которые воздействуют на устойчивость насыпи.

Как показали данные бурения в изучаемом районе, суглинки могут содержать линзы льда [9]. Мощность линз невелика и составляет первые десятки сантиметров, что в некоторой степени объясняет наличие высокоамплитудных осадок насыпи.

Динамические нагрузки на пылеватые оттаивающие обводненные грунты, которые могут превращаться в “пльвуны”, также могут увеличивать вертикальные деформации насыпи. В совокупности с повышенной влажностью грунтов под насыпью и воздействием динамической нагрузки от поездов могут проявиться тиксотропия в талых грунтах и их выдавливание из-под насыпи под воздействием динамической и статической нагрузок. Так, при полевых исследованиях были обнаружены пятна медальоны, характеризующиеся тиксотропными свойствами, размером от 0.3 до 0.8 м. Эти же образования предположительно находятся под насыпью и деформируются. Перераспределение напряжений, возникающее в грунте под насыпью, также является одним из факторов, значительно влияющим на деформации мерзлых грунтов при оттаивании, помимо их криогенного строения, влажности, льдистости, плотности [10].

На фоне формирования многолетней чаши оттаивания в нижних частях откосов насыпи и прилегающей полосе тундры возможно развитие криогенного пучения. Наличие этого процесса вполне объясняет зафиксированные просадки ж/д пути при достаточно малой влажности. Просадки начинаются в конце августа, но основная часть происходит в сентябре–октябре, так как

именно в это время наблюдается максимальная глубина сезонного оттаивания, что подтверждается данными математического моделирования. Однако в зимний период значительная часть величины осадок компенсируется морозным пучением оттаявших грунтов. Следует отметить, что на БАМе именно эти два процесса (осадки при оттаивании и сезонное пучение в условиях замкнутых криогенных систем) приводят к формированию сопряженных малоамплитудных пучин и просадок, на долю которых приходится почти половина деформирующегося пути [1]. В районе Северной железной дороги также наблюдались деформации пучения вследствие принудительного охлаждения грунтов насыпи термостабилизирующими системами (участок пересечения полотна Северной железной дороги подземным газопроводом ООО “Газпром Трансгаз Ухта” в районе железнодорожной станции Песец).

На процессы пучения и осадки оказывают влияние и особенности строения насыпей Северной железной дороги. Слой плотного песка, из которого состояла первая насыпь, и сейчас находящийся в центре насыпной призмы, имеет мощность 1–3 м. Сильно уплотненные, насыщенные водой прослои пылеватых песков при промерзании в осенне-зимний период превращаются в сезонно-мерзлые сильнольдистые горизонты. При оттаивании таких горизонтов могут происходить их локальное разуплотнение и выдавливание под динамической нагрузкой, что и приводит к дополнительной деформации сооружения насыпи.

ВЫВОДЫ

Установлено, что повторяемость просадок на разных участках насыпи железной дороги в разные годы сопряжена с разными инженерно-геологическими условиями и ведущими криогенными процессами. Поэтому для выработки стратегии инженерной защиты железной дороги требуется специальное геокриологическое районирование прилегающей территории. Предложены критерии ранжирования участков с просадками насыпи по степени их опасности, которые разделены по пространственному и временному признакам.

Основными причинами деформаций насыпи признаны осадки при оттаивании и деформации пылеватых переувлажненных грунтов на талых участках.

Разработанные подходы специального геокриологического районирования, применяемые совместно с организацией геотехнического и геокриологического мониторинга, а также с разработкой геокриологического прогноза, позволяют обосновать диагностику ведущего процесса, нарушающего инженерный объект, а также оценить значение долговременных тенденций и экстре-

мальных климатических и техногенных воздействий в изменении активности криогенных процессов. В частности, выявлено, что долговременные изменения климата приводят к фоновому изменению геокриологических условий (прежде всего температурного режима горных пород), а экстремальные климатические события и переменные техногенные нагрузки вызывают активизацию или затухание криогенных процессов.

Для эталонного участка рекомендуется разработать проект геотехнического мониторинга опасных геологических процессов с детальным алгоритмом выбора:

- комплексируемых методов инженерно-геологических изысканий;
- систем инструментального контроля динамики опасных геологических процессов;
- прогнозных расчетов изменения тепловых полей в теле железнодорожной насыпи и в основании железнодорожного полотна;
- технических решений стабилизации грунтов основания железнодорожной насыпи в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Работы выполнены в рамках государственного задания № 122022400105-9 по теме “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасенко В.Е., Гарагуля Л.С., Нистратова Т.А., Оспенников Е.Н. Развитие опасных геокриологических процессов на Центральном участке БАМ // Геоэкология. 1995. № 4. С. 70–81.
2. Войтенко А.С. Применение геокриологического районирования природно-технических систем для обоснования мероприятий инженерной защиты (на примере арктического участка Северной железной дороги): дис. ... канд. геол.-мин. н., М., 2017. 159 с.
3. Исаев В.С., Безделова А.П., Сергеев Д.О. Комплексный ландшафтный мониторинг многолетней мерзлоты в южной тундре (на примере полигона Хановей) // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. — Салехард: 2021, с. 173–176.
<https://doi.org/10.7868/9785604610848045>
4. Исаков В.А. Влияние криогенных процессов на устойчивость автомобильных и железных дорог: дис. ... канд. геол.-мин. н., М., 2016.
5. Методика мерзлотной съемки / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1979. 354 с.
6. Уварова А.В., Исаев В.С., Комаров И.А., Сергеев Д.О. и др. Результаты геотехнического мониторинга на учебно-научном полигоне Хановей // Мониторинг в криолитозоне: сб. статей [электронное издание сетевого распространения] / Под ред. Р.Г. Мотенко. М.: “КДУ”, “Добросвет”, 2022. С. 343–347.
<https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130>
7. Хименков А.Н., Халилова Ю.В., Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Угаров А.Н. Проблемы получения и использования актуальной информации о развитии геологических процессов при мониторинге трасс линейных объектов большой протяженности // Геоэкология. 2013. № 3. С. 264–271.
8. Isaev V., Komarov I., Uvarova A., Koshurnikov A., Sergeev D. et al. Results of Geotechnical monitoring at the scientific test site “Khanovey” in the North East part of Russian Arctic / Proc. Conf. AGU FALL MEETING 2022. <https://agu.confex.com/agu/fm22/meetingapp.cgi/Paper/1066056>
9. Isaev V., Kotov P., Sergeev D. Technogenic hazards of russian north railway // Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 1 (49). 2020. P. 311–320.
10. Kotov P.I., Roman L.T., Sakharov I.I., Paramonov V.N., Paramonov M.B. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2015. V. 52 (5). P. 254–261.
<https://doi.org/10.1007/s11204-015-9337-5>
11. Kotov P.I., Roman L.T., Tsarapov M.N. Forecast settlement of frozen soils after thawing, J. Heilongjiang Univ. Eng. 2014. V. 5. N 3. P. 1–5.
12. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina C.B., et al. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // Energies. 2022. T. 15. № 9. С. 3190.
<https://doi.org/10.3390/en15093190>
13. Povoroznyuk O., Vincent W.F., Schweitzer P., Laptander R. et al. Arctic roads and railways: social and environmental consequences of transport infrastructure in the Circumpolar North // Arctic Science, 11 August 2022.
<https://doi.org/10.1139/AS-2021-0033>
14. Rossi M., Dal Cin M., Picotti S., Gei D., Isaev V.S. et al. Active Layer and Permafrost Investigations Using Geophysical and Geocryological Methods—A Case Study of the Khanovey Area, Near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic // Frontiers in Earth Science. 2022. T. 10. С. 910078–910078.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.910078>
15. Sergeev D. Permafrost-Related Geohazards in Cold Russian Regions // Natural Hazard Science. 2018.
<http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-291>
16. Voytenko A., Sergeev D., Chesnokova I. The main directions of securing geocryological safety of economic activity in the Arctic region. Heininen, L.H. Exner-Pirot, and J. Barnes (eds.) Redefining Arctic Security: Arctic Yearbook, 2019. Akureyri, Iceland: Arctic Portal. <https://www.arcticyearbook.com>, pp. 210–216.

TEMPORAL AND SPATIAL PATTERNS OF PERMAFROST PHENOMENA ALONG OPERATED RAILROAD IN THE SOUTHERN PART OF BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA UNDER A CHANGING CLIMATE

A. A. Gorbunova^{a, #}, G. Z. Zaripova^{a, ##}, V. S. Isaev^{b, ###}, V. N. Manskii^{a, ####}, R. V. Sobin^{a, #####},
D. O. Sergeev^{c, #####}, and A. P. Bezdelova^{a, #####}

^aGeological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^bReserch Center for the Arctic Study,
ul. Respubliki, 20, Salekhard, 629007 Russia

^cSergeev Institute of Environmental Geoscience RAS
Ulanskii per., 13, str.2, Moscow, 101000 Russia

[#]E-mail: gorbunova.alina2000@yandex.ru

^{##}E-mail: guzel.zaripova1998@yandex.ru

^{###}E-mail: vsisaev@yanao.ru

^{####}E-mail: parhelia1997@gmail.com

^{#####}E-mail: rsobin@yandex.ru

^{#####}E-mail: cryo@geoenv.ru

^{#####}E-mail: abezdelova@mail.ru

As a result of monitoring observations, it was found that the frequency of subsidence in different sections of the railway embankment in different years is associated with different engineering and geological conditions and leading cryogenic processes. It requires the special geocryological zoning of the territory adjacent to the railway to develop an engineering protection strategy. The criteria for ranking areas with embankment settlements according to their hazard degree, which are divided according to spatial and temporal characteristics are proposed. It was revealed that the long-term climate changes lead to a regional change in geocryological conditions (primarily the temperature regime of soil). The extreme climatic events and variable technogenic loads cause activation or attenuation of cryogenic processes.

Keywords: permafrost phenomena, tundra, climate change, thermal settlement

REFERENCES

1. Afanasenko, V.E., Garagulya, L.S., Nistratova, T.A., Ospennikov, E.N. *Razvitie opasnykh geokriologicheskikh protsessov na Tsentral'nom uchastke BAM* [Development of hazardous geocryological processes in the Central section of BAM]. *Geokologiya*, 1995, no. 4, pp. 70–81. (in Russian)
2. Voitenko, A.S. *Primenenie geokriologicheskogo raionirovaniya prirodno-tekhnicheskikh sistem dlya obosnovaniya meroriyatii inzhenernoi zachshity (na primere arkticheskogo uchastka Severnoi zheleznoi dorogi)* [Application of geocryological zoning of natural anthropogenic systems to justify engineering protection measures (by the example of the Arctic section of the Northern Railway)]. Cand. Sci. (Geol.-min.) dissertation, Moscow, 2017, 159 p. (in Russian)
3. Isaev, V.S., Bezdelova, A.P., Sergeev, D.O. *Kompleksnyi landshaftnyi monitoring mnogoletnei merzloty v yuzhnoi tundre (na primere poligona Khanovei)* [Combined landscape monitoring of permafrost in the southern tundra (by the example of the Khanovei test site)]. *Sovremennye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike* [Current studies in the cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic]. V.P. Melnikov and M.R. Sadurtdinov, Eds. Salekhard, 2021, pp. 173–176.
4. Isakov, V.A. *Vliyanie kriogennykh protsessov na ustoichivost avtomobil'nykh i zheleznykh dorog* [Influence of cryogenic processes on the sustainability of automobiles and railways]. Cand. Sci. (Geol.-min.) dissertation, Moscow, 2016. (in Russian)
5. *Metodika merzlotnoi s'emki* [Permafrost survey technique]. V. A. Kudryavtsev, Ed., Moscow, MGU Publ., 1979, 354 p. (in Russian)
6. Uvarova, A.V., Isaev, V.S., Komarov, I.A., Sergeev, D.O. et al. *Rezultaty geotekhnicheskogo monitoringa na uchebno-nauchnom poligone Khanovei* [Results of geotechnical monitoring at the educational and scientific point of Khanovey]. *Monitoring v kriolitozone* [Monitoring in the permafrost zone]. R.G. Motenko, Ed., Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2022, pp. 343–347. [Electronic edition of network distribution]. <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130> (in Russian)
7. Khimenkov, A.N., Khalilova, Yu.V., Sergeev, D.O., Pershtein, G.Z., Ugarov, A.N. *Problemy polucheniya i ispol'zovaniya aktual'noi informatsii o razvitiy geologicheskikh protsessov pri monitoringe trass lineinykh ob'ektov bol'shoi protyazhennosti* [Problems of obtaining and using up-to-date information on the development of geological processes upon monitoring routes of long linear

- structures]. *Geoekologiya*, 2013, no. 3, pp. 264–271. (in Russian)
8. Isaev, V., Komarov, I., Uvarova, A., Koshurnikov, A., Sergeev, D., et al. Results of geotechnical monitoring at the scientific test site “Khanovey” in the North East part of Russian Arctic. Proc. Conf. AGU fall meeting 2022. <https://agu.confex.com/agu/fm22/meetingapp.cgi/Paper/1066056>.
 9. Isaev, V., Kotov P., Sergeev D. Technogenic hazards of Russian North railway. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol. 1 (49), pp. 311–320.
 10. Kotov, P.I., Roman, L.T., Sakharov, I.I., Paramonov, V.N., Paramonov, M.B. Influence of thawing conditions and type of testing on deformation characteristics of thawing soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2015, vol. 52 (5), pp. 254–261. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9337-5>
 11. Kotov, P.I., Roman, L.T., Tsarapov, M.N. Forecast settlement of frozen soils after thawing, *J. Heilongjiang Univ. Eng.*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 1–5.
 12. Melnikov, V.P., Osipov, V.I., Brouchkov, A.V., Badi-na, S.V. et al. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 9, pp. 3190. <https://doi.org/10.3390/en15093190>
 13. Povoroznyuk, O., Vincent, W.F., Schweitzer, P., Laptander, R., et al. Arctic roads and railways: social and environmental consequences of transport infrastructure in the Circumpolar North. *Arctic Science*, 11 August 2022. <https://doi.org/10.1139/AS-2021-0033>
 14. Rossi, M., Dal Cin, M., Picotti, S., Gei, D., Isaev, V.S., et al. Active layer and permafrost investigations using geophysical and geocryological methods—a case study of the Khanovey area, near Vorkuta, in the NE European Russian Arctic. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 910078–910078. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.910078>
 15. Sergeev, D. Permafrost-related geohazards in cold Russian Regions. *Natural hazard science*. 2018. <http://naturalhazardscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-291>
 16. Voytenko, A., Sergeev, D., Chesnokova, I. The main directions of securing geocryological safety of economic activity in the Arctic region. Heininen, L.H. Exner-Pirot, J. Barnes, Eds., *Redefining Arctic Security: Arctic Yearbook*, 2019, pp. 210–216. Akureyri, Iceland: Arctic Portal. <https://www.arcticyearbook.com>