

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Шатилов И.С., Шибасов Г.В., Литвинчук А.С.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, e-mail: litwinchuk1@yandex.ru*

В статье рассмотрены проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог и мостов в районах вечной мерзлоты. Из-за изменения климата, включая таяние вечной мерзлоты, дорожные сооружения, расположенные в этих районах, подвергаются риску полного или частичного разрушения. При повышении температуры вечномерзлых грунтов происходит деформация грунта в основании инженерных сооружений, что негативно влияет на устойчивость сооружений. На основе учета ситуаций климатического характера и процессов, происходящих вблизи дорог, и имеющих случайный характер, в МАДИ разработана модель оценки рисков утраты работоспособности участков дорог. Описаны различные инженерные способы поддержания низкой температуры грунта основания дорожного сооружения, применяемые на практике. Предложено в сооружениях на вечной мерзлоте использовать термостабилизаторы для поддержания низкой температуры оснований дорожных объектов. Однако, величина риска потери работоспособности дорожных сооружений зависит не только от климатических условий эксплуатации дорог или мостов, но и от их конструктивных особенностей. Учеными МАДИ доказана целесообразность применения свайно-эстакадных дорожных сооружений в районах вечной мерзлоты, поскольку их строительство и эксплуатация протекают с минимальным негативным влиянием на окружающую среду.

**Ключевые слова:** вечная мерзлота, транспортная инфраструктура, термостабилизатор, риски потери работоспособности

## ECOLOGICAL FEATURES OF ESTABLISHMENT AND OPERATION OF ROAD STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF PERMAFROST

Shatilov I.S., Shibasov G.V., Litvinchuk A.S.

*Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),  
Moscow, e-mail: litwinchuk1@yandex.ru*

The article deals with the problems of construction and operation of highways and bridges in permafrost regions. Due to climate change, including melting permafrost, road structures located in these areas are at risk of complete or partial destruction. With an increase in the temperature of permafrost soils, soil deformation occurs at the base of engineering structures, which negatively affects the stability of structures. On the basis of taking into account climatic situations and processes occurring near roads, and having a random nature, MADI has developed a model for assessing the risks of loss of serviceability of road sections. Various engineering methods of maintaining a low temperature of the soil of the base of a road structure, used in practice, are described. It is proposed to use thermal stabilizers in structures on permafrost to maintain a low temperature of the foundations of road objects. However, the magnitude of the risk of loss of serviceability of road structures depends not only on the climatic conditions of operation of roads or bridges, but also on their design features. Scientists of MADI have proved the feasibility of using pile-elevated road structures in permafrost regions, since their construction and operation proceed with minimal negative impact on the environment.

**Keywords:** permafrost, transport infrastructure, thermal stabilization of soil, risks of loss of performance

Вечная мерзлота (многолетняя криолитозона) распространена на одной пятой суши Земного шара. Это области планеты, в которых среднегодовая температура верхнего слоя земли не поднимается выше нуля. Климат в таких регионах является холодным, и средняя температура воздуха всегда остается ниже нуля.

Площадь вечной мерзлоты в Российской Федерации занимает свыше 11 млн км<sup>2</sup>, (что составляет около 65% ее территории), из них – 3,5 млн км<sup>2</sup> являются зоной сплошной мерзлоты. Земля на такой территории является заморзшей в течение трех и более лет, т.е. представляет собой вечномерзлые и многолетнемерзлые грунты. В них содержатся частички льда, меняющие свойства исходных немерзлых грунтов.

Негативные последствия от климатических изменений, такие как увеличение выбросов углекислого газа и метана в грунтах повышенной влажности [1, с. 20], приводящее к повышению температуры окружающей среды (рис. 1), и, как следствие, к таянию мерзлоты, напрямую влияют на условия возведения и работу транспортной инфраструктуры. Климатические риски потери работоспособности являются основными при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог с твердым покрытием, дорожных сооружений и мостов.

Оттаивание мерзлоты ведет к снижению несущей способности грунта, приводит к появлению дополнительных отложений оттаивающего грунта и деформации насыпи дорожных сооружений. Именно поэтому

70% инфраструктуры в Арктической зоне находятся в зоне риска.

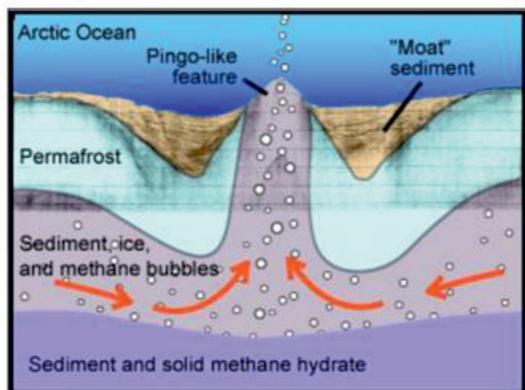


Рис. 1. Выбросы метана в вечной мерзлоте [1, с. 21]

К 2030 г. в связи с изменением климата ожидается увеличение на 20% стихийных бедствий и рисков, связанных с функциональными потерями транспортной инфраструктуры на территории вечной мерзлоты. Потепление способствует деградации или исчезновению вечной мерзлоты к 2050 г. на территории России более, чем на 3,6 млн км<sup>2</sup>, а к 2150 г. –

на 5,6 млн км<sup>2</sup> [2, с. 17] (рис. 2). В связи с этим должна быть полностью заменена транспортная инфраструктура, возведенная традиционным способом.

Так на федеральных трассах Р-21 «Кола», Р-297 «Амур», А-331 «Виллой» есть несколько участков, расположенных на территории с прерывистой и пятнистой вечной мерзлотой [3, с. 259]. Причина появления воронок и других дефектов на дорожном полотне – чрезмерное оттаивание и оседание грунта. Учеными МАДИ (на основе наблюдений за климатическими параметрами в течение года) была разработана математическая модель, которая учитывает наличие и глубину воронок, выбоин на дороге. В рамках этой модели доказано, что хаотично расположенные просадки дорожного покрытия приводят к максимально возможному снижению скорости автотранспорта и снижению пропускной способности дороги [4, с. 66-69; 5, с. 276-279].

Например, на автодороге «Амур», соединяющей Читу с Хабаровском, вследствие оттаивания вечномерзлых грунтов каждый год происходит просадка насыпи дороги (рис. 2). Для ремонта дороги провалы засыпаются щебнем и заново асфальтируются, поскольку данная трасса является единственной дорогой между Дальним Востоком и Сибирью.

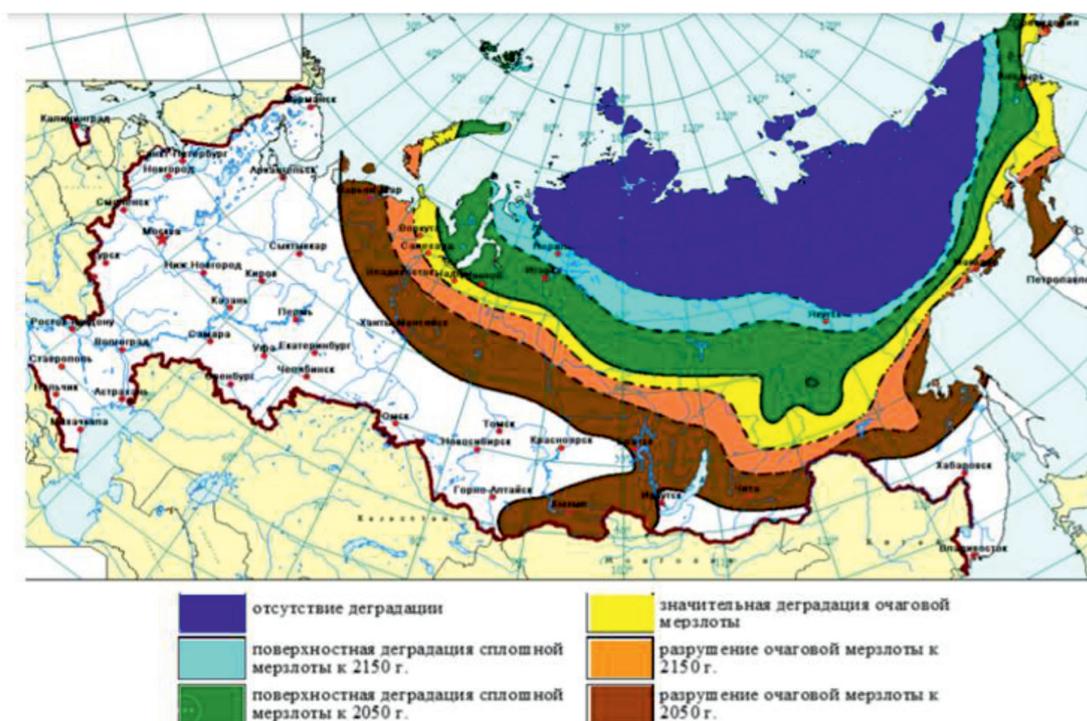


Рис. 2. Деградация мерзлоты на территории России до 2150 г. [2, с. 18]

Колебания температуры окружающей среды приводят не только к оттаиванию, но и к обледенению, причем образование наледей возможно не только на поверхности земли. Так, в ноябре 2020 г. в г. Владивостоке произошло обледенение вантов Русского моста. Из-за двухдневного циклона и отрицательных температур на вантах под нагрузкой наледи была разрушена декоративная оболочка, служащая для герметизации и защиты от атмосферных осадков несущих конструкций (стальных тросов). С помощью промышленных альпинистов было удалено более 2 000 тонн льда. Обледенение вантов в России это третий по счету случай в мире после аналогичных происшествий в Канаде и Европе.

Одним из способов предотвращения обледенения мостовых сооружений является метод обогрева конструкции моста с помощью саморегулирующихся греющих кабелей, по которым пропускают ток, за счет чего металлические стержни внутри кабелей нагреваются, защищая мостовое сооружение от наледей.

Несмотря на возникающие проблемы при эксплуатации вантовых мостов в сложных климатических условиях в скором будущем планируется возведение вантового моста протяженностью 3,12 км через р. Лена в Якутске. Этот мост соединит левую часть города, которая зимой оказывается отрезанной от правой части Якутска, с правой. Поскольку Якутск расположен в вечной мерзлоте и зоне высокой сейсмичности, строительство считается слишком трудоемким и дорогостоящим. Рассматривался вариант строительства тоннеля под Ленной, но он был отвергнут из-за сложности строительства в условиях вечной мерзлоты. Если проект по созданию транспортно-логистического узла и возведению моста удастся осуществить, он будет сопоставим по масштабу решаемых инженерных задач с возведением Керченского моста в Крыму.

Очевидно, что при возведении строительных объектов и транспортных сооружений проводятся инженерно-гидрологические и геофизические изыскания, ведутся научные наблюдения поведения подземных вод, изучаются колебания температуры воздуха и грунтов. Выбирать место под строительство дорог рекомендуется в местах с крупнозернистой, песчаной почвой, там, где вечная мерзлота меньше оседает после таяния. При этом рекомендуется также учитывать число циклов замерзания – оттаивания в течение года, т.к. работа конструкций в неблагоприятных, часто изменяющихся климатических условиях приводит к преждевременному износу и разруше-

нию материалов, из которых эта конструкция выполнена.

Основными климатическими параметрами, влияющими на снижение функциональности дорожной сети в результате изменения климата, являются температура воздуха и скорость ветра в пограничном слое атмосферы.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния климатических условий строительства и эксплуатации дорожных сооружений в зоне вечной мерзлоты.

#### **Материалы и методы исследования**

Материалами исследования служили литературные источники, находящиеся в свободном доступе по климатическим особенностям возведения и эксплуатации дорожных сооружений. Рассмотрены способы решения проблемы по уменьшению теплообмена между сооружениями и вечномерзлыми грунтами.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Учет чрезвычайных природных ситуаций и процессов, происходящих вблизи дорог, позволил ученым МАДИ разработать метод количественной оценки рисков функциональных потерь для участков дорожной сети [6, с. 32-34]. Рассчитано, что уровень риска, прогнозируемый для участков дорог в районе Якутска и Уренгоя, с повышением среднегодовой температуры воздуха в результате потепления до  $+2^{\circ}\text{C}$ , оценивается как средний [4, с. 72].

Негативное влияние климатических условий необходимо исключить не только при проектировании и эксплуатации сооружений, но и при выборе строительных материалов – металлов, бетона. Существующие проблемы прочности и разрушения металлов, вопросы теплообмена и теплофизических свойств металлов при низких температурах изучаются ведущими научными институтами России. Сотрудники МАДИ выполняют грант Минобрнауки по исследованию и созданию технической лаборатории в рамках госзадания по теме «Создание методологических основ разработки конструкционных материалов для использования в условиях Арктики».

Сталь, бетон и другие строительные материалы должны надежно работать при резких перепадах температуры воздуха, воды, грунта и при других неблагоприятных условиях, приводящих к развитию коррозионных процессов, которые, в свою очередь, ведут к потере целостности конструкции. Так, к сталям предъявляются требования по прочности в условиях ра-

боты до минус 60 °С, отсутствию хладноломкости, пределу текучести до 890 МПа, высокой коррозионной стойкости, надежности работы в условиях статических и динамических нагрузок.

Традиционно мостовые опоры изготавливают из бетона и армированной стали, однако применение новых интеллектуальных материалов и новых технологий является хорошей альтернативой традиционным [7, с. 59]. Так, в МАДИ ученые предложили адаптировать композиты на основе волокнистых наполнителей (углепластики, стеклопластики, базальтопластики и др.) к экстремальным холодам, вводя в состав композитов жидкую матрицу.

Несущая способность свай моста сильно зависит от температуры грунта и значительно повышается при понижении температуры. Таким образом, сохранение низких температур грунтов способствовало бы решению проблемы надежности при эксплуатации дорожных сооружений в условиях оттаивания вечной мерзлоты.

Для термостабилизации грунтов в зоне вечной мерзлоты существуют различные технические средства и инженерные решения: навесы от солнца и осадков, использование нетканых синтетических материалов, теплоизоляция откосов с помощью специальных материалов, использование изоляционных слоев при строительстве дорог, охлаждение грунтов в зоне вечной мерзлоты (использование «диодов», тепловых амортизаторов, тепловых трансформаторов).

Рассмотрим некоторые варианты решения проблемы по исключению теплового влияния сооружений на вечномёрзлые грунты.

*1. Создание растительного покрова вблизи дорог.* Для этого необходимо использовать растения, у которых корневая система располагается в слое летнего оттаивания. Летом верхний тонкий слой почвы и грунта оттаивает, а образующуюся при этом влагу поглощают растения.

*2. Сохранение мерзлоты в насыпи.* Используя естественные и искусственные теплоизоляционные материалы, выбирают такую конструкцию дорожного полотна, чтобы тепло не проникало в вечную мерзлоту под дорогой.

*3. Предварительное оттаивание вечномёрзлых грунтов (за год до начала работ) и слоев льда в зоне будущего строительства дороги с последующим осушением насыпи.* Данный способ считается эффективным только в том случае, если будет сохраняться положительная среднегодовая температура грунта в основании насыпи на всем протяжении эксплуатации сооружения.

*4. Использование проветриваемых свайно-эстакадных дорог* вместо традиционных дорог на земляном полотне. Этот принцип строительства позволяет исключить тепловое воздействие на вечномёрзлые грунты за счет отсутствия прямого контакта с грунтом и наличия регулярного проветривания под дорожным полотном, однако является материалоемким и приводит к значительному удорожанию фундаментов.

Несмотря на завышенную стоимость свайно-эстакадной дороги балочного типа по сравнению с другими вариантами, она имеет неоспоримые преимущества, ей присущи: минимальная зависимость от грунтовых условий, минимальное воздействие на окружающую среду. Строительство не зависит от времени года, при этом происходит улучшение температурного режима под дорогой, а из-за отсутствия насыпи достигается уменьшение ширины землеотвода, что ведет к увеличению срока эксплуатации и ремонтпригодности сооружений. Наибольший экономический эффект достигается при использовании конструкций такого типа в мерзлотно-талых, болотных условиях, а не в грунтах. Абсолютную устойчивость трассы при этом можно обеспечить при заглублении свай до коренных отложений. Высокое расположение проезжей части дороги над поверхностью земли не создает зон подтопления или пересыхания, не изменяет сложившийся сток грунтовых вод. Специфика конструкции не требует создания традиционной системы отвода вод, дренажа, гидроизоляции, и, в целом, не нарушает приповерхностный гидрологический и экологический режим участка строительства [8, с. 104].

В МАДИ произведен также расчет экономической эффективности применения свайно-эстакадных мостов в различных грунтово-геологических и климатических условиях, разработаны математические модели свайно-эстакадных мостов методом конечных элементов в программном комплексе «MIDAS CIVIL». Техническим результатом исследований является прогнозируемое повышение несущей способности, эксплуатационной надежности и длительности срока службы свайно-эстакадных сооружений.

*5. Использование отдельных термостабилизаторов в сооружениях.*

Для арктических районов Севера в МАДИ разработаны новые технические решения для надежной эксплуатации свайно-эстакадных дорожных сооружений с системой аккумуляции холода за счет применения термостабилизаторов.

Одним из вариантов решения проблемы является искусственное замораживание грунта оснований и фундаментов сооружений. В сооружении на вечной мерзлоте, содержащем раму из швеллеров с расположенным на ней экструдированным утеплителем, металлические трубы выполняют роль опор-стоек. Внутри опор расположены термостабилизаторы. Пространство между трубой и термостабилизатором заполняется грунтом.

Для повышения надежности свайно-эстакадных сооружений учеными МАДИ предлагается на некоторых критических участках дорог «Кола», «Амур», «Вилюй», «Лена» применять технологию термостабилизации грунтов с использованием парожидкостных устройств сезонного охлаждения, которые погружаются в винтовые сваи (рис. 3) [3, с. 261-262]. Как видно из рис. 4, на глубине до 10 м удается с помощью стабилизатора поддерживать отрицательные температуры грунта до значений минус 10 °С.

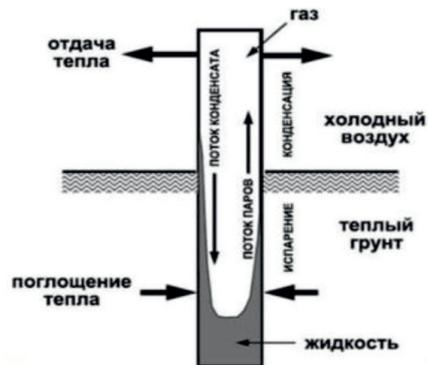


Рис. 3. Устройство термостабилизатора и расположение термостабилизаторов вдоль дорожного полотна [9, с. 11]

Для мостовых сооружений с целью защиты от ледохода и карчехода (карчеход – движение в паводок или половодье деревьев с кроной и корневой системой) нижний пояс труб закрывается трубой большего диаметра, заполненной пенополиуретаном. Ускоренное движение боль-

ших глыб льда оказывает высокое давление на опоры моста. Для устранения проблем, связанных с ледяными потоками, конструкция моста или пирса должны иметь аэродинамическую форму, чтобы лед огибал мост при движении.

В верхнем поясе трубы объединяются сваренным двутавром, на который устанавливаются двутавры силового ригеля. Устройство гидрозамков производится путем инъектирования грунта вокруг опор с помощью труб, расположенных под рамой из швеллеров. По результатам проведенных исследований сотрудниками МАДИ получен патент на изобретение [10], диплом и бронзовая медаль на XX Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед 2017».

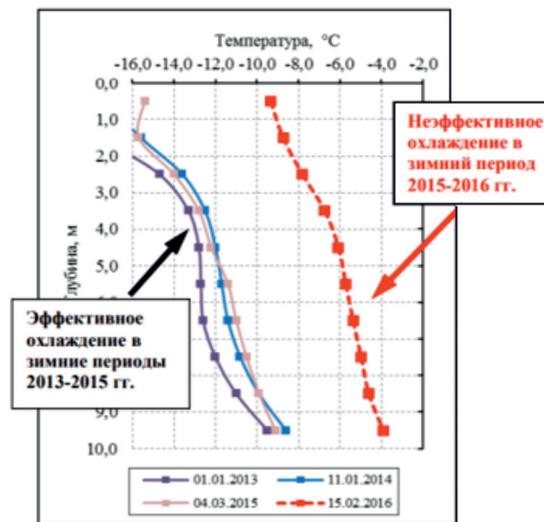


Рис. 4. Распределение температуры по глубине грунта в случае использования термостабилизатора (с. 85) [11, с. 8]

Таким образом, большинство важных экономических транспортных связей России находится в регионах вечной мерзлоты и поддержание удовлетворительного состояния уже построенных дорожных сооружений, а также создание новых более устойчивых к суровым условиям вечной мерзлоты конструкциям является важным направлением дорожно-строительного развития России.

### Выводы

1. Рассмотрены применяемые инженерные решения по сохранению температурного режима на дорожных сооружениях в зоне вечной мерзлоты, указаны их преимущества и недостатки;

2. Раскрыты преимущества процесса замораживания грунта оснований и фундаментов сооружений путем термостабилизации;

3. Обоснована эффективность эксплуатации свайно-эстакадных дорожных сооружений с использованием термостабилизаторов в районах вечной мерзлоты.

#### Список литературы

1. Arctic regions and its concerns, threats and potential challenges // Arctic Regions: Concerns, Threats and Potential Challenges. Narvik University College. 2010. [Электронный ресурс]. URL: [https://ec.europa.eu/echo/files/civil\\_protection/civil/prote/pdffdocs/pretear\\_final\\_report\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/echo/files/civil_protection/civil/prote/pdffdocs/pretear_final_report_en.pdf) (дата обращения: 24.10.2021).
2. Елесин М.А. О перспективах развития создания мерзлотной лаборатории и основных направлениях ее развития // Научный вестник Арктики. 2019. № 7. С. 16-21.
3. Trofimenko Y.V., Evgenev G.I., Shashina E.V. Functional Loss Risks of highways in Permafrost Areas Due to Climate Change. *Procedia Engineering*, 2017, P. 258-264.
4. Trofimenko Y.V., Yakubovich A.N., Yakubovich I.A., Shashina E.V. Modeling of influence of climate change character on the territory of the cryolithozone on the value of risks for the road network. *International journal of online and biomedical engineering*, 2020, vol.16, no 7, P. 65-74.
5. Yakubovich A.N., Trofimenko Yu.V., Yakubovich I.A., Shashina E.V. A forecast model for a road networks section traffic capacity assessment on a territory of the cryolithozone in conditions of the climate change. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019, vol.7, no 1, P. 275-280.
6. Трофименко Ю.В., Якубович А.Н. Методика оценки риска утраты функциональности автомобильных дорог на территориях распространения многолетней (вечной) мерзлоты в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями // Безопасность в техносфере. 2016. Т. 5. № 5. С. 27-37.
7. Тимофеева Г.Ю., Литвинчук А.С. Особые условия эксплуатации как стимул применения аддитивных технологий на примере тормозной системы автомобиля // Наука и техника в до-рожной отрасли: международная конференция с участием молодых ученых (Москва, 18 марта 2021 г.). В 4 ч. Ч.2. Дорожно-строительная техника / МАДИ. М., 2021. С. 58-61.
8. Джантимиров Х.А., Шатилов С.Н., Валиев Ш.Н. Концепция строительства автодорог из сборных железобетонных элементов на комбинированном основании // ДОРОГИ: Инновации в строительстве. 2015. № 44. С. 102-104. [Электронный ресурс]. URL: <http://techinform-press.ru/PDFS/roads44.pdf> (дата обращения: 24.10.2021).
9. Игошин М.Е. Стабилизация основания и насыпи автомобильных дорог в условиях кружевного распространения многолетнемерзлых грунтов. [Электронный ресурс]. URL: <https://ppt-online.org/666293> (дата обращения: 24.10.2021).
10. Джантимиров Х.А., Шатилов С.Н., Поспелов П.И., Валиев Ш.Н. Автомобильная дорога // Патент РФ № 2589138. Патентообладатели Джантимиров Х.А., Шатилов С.Н. 2016. Бюл. № 19. [Электронный ресурс]. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2589138C2.pdf> (дата обращения: 24.10.2021).
11. Николайчук Э.Н., Васильева А.О., Пахунов А.В. Актуальные вопросы эксплуатации сезонно-действующих охлаждающих устройств // Сборник докладов расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» МГУ, 2018. т. 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.geogr.msu.ru/structure/labs/geos/nauchd/downloads/Geokriol-T2-disk-compressed.pdf> (дата обращения: 28.10.2021).