

СТАТЬИ

УДК 624.154.1

DOI 10.17513/use.38193

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ ЯКУТИИ****¹Большев К.Н., ¹Степанов А.В., ¹Малышев А.В., ²Ефимов В.М.**¹*ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»**Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова**Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: k.bolshev@mail.ru;*²*АО «Якутский государственный проектный научно-исследовательский**институт строительства», Якутск, e-mail: yapniis@mail.ru*

Исследование направлено на решение актуальной проблемы стабилизации температурного режима площадок строительства и эксплуатации инженерных сооружений в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия) и изменяющегося климата. Применяемый в настоящий момент метод охлаждения грунта с помощью сезонно действующих охлаждающих устройств требует, при всей его эффективности, продолжительного времени воздействия и значительно задерживает сроки строительства, что в ряде случаев неприемлемо. С целью оценки эффективности и перспективности технологии быстрой заморозки грунта с применением твердого диоксида углерода (сухой лед) для охлаждения вечномерзлых грунтов был выполнен натурный эксперимент. Для проведения эксперимента был оборудован полигон на одной из строительных площадок г. Якутска с обустройством охлаждающей и термометрических скважин. Во время эксперимента велась регистрация температурного поля грунта и температуры внутри охлаждающей скважины. В результате проведенных экспериментов получены фактические данные по распределению температуры в грунте в зависимости от температуры и расстояния от охлаждающей скважины в процессе охлаждающего воздействия и после него. Полученные результаты дают основания для оценки испытанной технологии как перспективной в условиях многолетнемерзлых грунтов Якутии.

Ключевые слова: Республика Саха (Якутия), многолетнемерзлые грунты, охлаждение, сухой лед, свайный фундамент, основания

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS
OF GROUND COOLING USING SOLID CARBON DIOXIDE
IN THE CONDITIONS OF THE CRYOLITHOZONE OF YAKUTIA****¹Bolshev K.N., ¹Stepanov A.V., ¹Malyshev A.V., ²Efimov V.M.**¹*V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: k.bolshev@mail.ru;*²*Yakut State Design and Research Institute of Construction, Yakutsk, e-mail: yapniis@mail.ru*

The study is aimed at solving the urgent problem of stabilizing the temperature regime of construction sites and operation of engineering structures in the permafrost zone of the Republic of Sakha (Yakutia) and a changing climate. The currently used method of soil cooling using seasonally operating cooling devices, despite its effectiveness, requires a long exposure time and significantly delays construction time, which in some cases is unacceptable. In order to evaluate the effectiveness and prospects of the technology of rapid soil freezing using solid carbon dioxide (dry ice) for cooling permafrost soils, a full-scale experiment was carried out. To conduct the experiment, a test site was equipped at one of the construction sites in Yakutsk with the installation of cooling and thermometric wells. During the experiment, the temperature field of the soil and the temperature inside the cooling well were recorded. As a result of the experiments, actual data were obtained on the distribution of temperature in the soil depending on the temperature and distance from the cooling well during the cooling effect and after it. The results obtained provide grounds for assessing the tested technology as promising in the conditions of permafrost soils in Yakutia.

Keywords: Yakutia, permafrost soils, cooling, dry ice, pile foundation, foundation basis

В регионах распространения многолетнемерзлых грунтов проблема стабилизации температурного режима грунтов оснований площадок строительства всегда имеет большую актуальность. В процессе подготовки площадки и обустройства нулевого цикла происходит нарушение температурного режима грунтов, и последующая его естественная стабилизация либо занимает продолжительное время, либо не дает необходимого

результата, то есть в итоге температура грунта не достигает проектных значений. Особенно актуальной данная проблема становится на фоне наблюдающихся в последнее время изменений климата и криолитозоны. Многие исследователи в последнее время отмечают повышение температуры вечномерзлых грунтов в различных регионах и связывают его с повышением климатических температур и изменением режима осадков [1–3].

Для обеспечения необходимой несущей способности грунтов оснований и повышения расчетной нагрузки все чаще требуются мероприятия по принудительному понижению температуры грунтов. При этом широко применяемый настоящий метод охлаждения с помощью парожидкостных термостабилизаторов или, как их еще называют, сезонно действующих охлаждающих устройств [4], при всей его эффективности, требует продолжительного времени действия, зависим от сезона и значительно увеличивает сроки строительства, что в ряде случаев неприемлемо. Поэтому в настоящее время остро стоит необходимость применения технологий быстрой заморозки грунта, не зависящих от сезона.

Известен метод быстрого охлаждения, при котором в качестве охлаждающего вещества – криоагента применяется твердый диоксид углерода (сухой лед) [5]. Данный метод часто используют при подземном строительстве для быстрой заморозки, образования так называемого ледогрунтового ограждения со средней температурой около $-10 - -25^{\circ}\text{C}$ и обеспечения стабильного монолитного состояния грунтов в процессе строительства. Для этого в грунтовом массиве обустраивается поле охлаждающих скважин, в каждую из которых в ходе процесса постоянно загружается криоагент (в виде гранул, кусков или снега). Твердый диоксид углерода сублимируется, испаряясь, при температуре выше $-78,5^{\circ}\text{C}$, и данный процесс требует удельных затрат тепловой энергии порядка 600 кДж/кг [6].

В результате теплового взаимодействия криоагента с грунтом происходит его охлаждение и заморозка. Процесс заморозки при этом занимает примерно от 5 до 15 суток, количество охлаждающих скважин исчисляется десятками штук, а расход сухого льда исчисляется тоннами [7, 8].

Целью проведенного исследования являлась оценка применимости данного метода для понижения температур грунтов оснований в условиях вечной мерзлоты Якутии.

Цель исследования – оценка эффективности и перспективности метода быстрой заморозки грунта с применением твердого диоксида углерода (сухого льда) для понижения температуры грунтов оснований в условиях вечномерзлых грунтов Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы исследования

Для проведения натурного эксперимента был оборудован полигон на одной из площадок строительства в г. Якутске с установленными сваями СМ12-40-85 длиной 12 м, заглубленных на 9 м (рис. 1). Расчетная нагрузка на сваи составляет $150-170 \text{ т}$. На расстоянии 300 мм от средней сваи была установлена охлаждающая скважина, обсаженная металлической трубой внутренним диаметром 100 мм, глубиной 9 м.

Термометрические скважины, расположенные на расстоянии 750 и 1500 мм, изготовлены из полипропиленовой трубы диаметром 40 мм, глубиной 10 м. Термометрическая скважина, расположенная на расстоянии 1700 мм, изготовлена из стальной трубы диаметром 50 мм, глубиной 10 м.

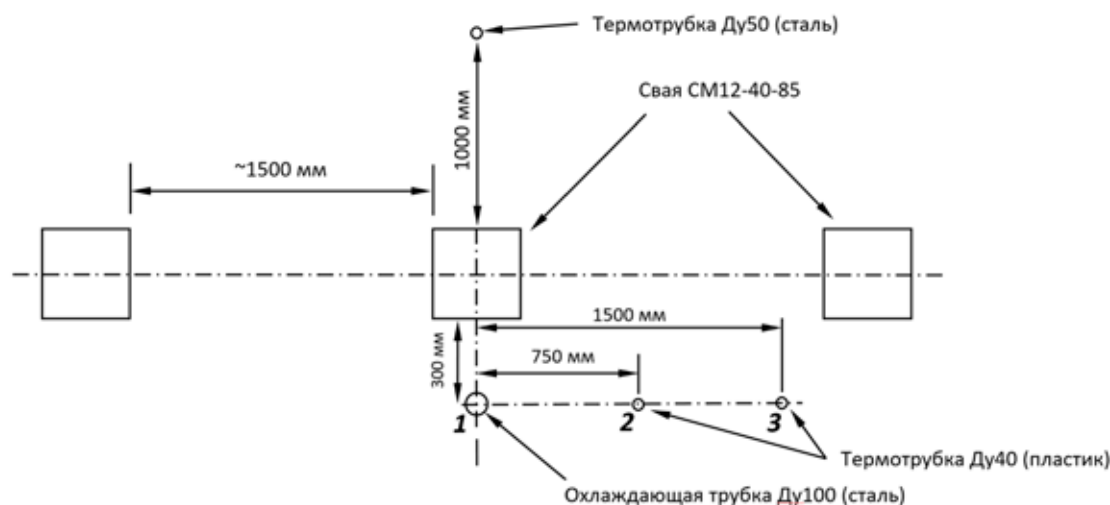


Рис. 1. Схема расположения охлаждающей трубки (1) и термотрубок (2, 3) относительно испытываемой сваи

В качестве криоагента был взят сухой лед, производимый на станции Якутская ТЭЦ из сжиженного углекислого газа. Загрузка криоагента производилась на высоту 3–4 м от дна скважины, примерная масса одной загрузки составляла 20 кг.

Грунты оснований (табл. 1) представлены засоленными суглинками влажностью 0,3–0,4 д. ед. (до глубины 1,5 м), засоленными песками пылеватыми влажностью 0,3 д. ед. (1,5–3 м), песками слабольдистыми влажностью 0,3 д. ед. (от 3 м и глубже).

В ходе эксперимента производилась регистрация температур в термометрических скважинах, температуры и высоты столба сухого льда в охлаждающей скважине (рис. 2). Регистрация температуры в термометрических скважинах производилась с помощью многозонных датчиков температуры с радиолотгерами производства АО НПП «Эталон», г. Омск. Температура в охлаждающей скважине контролировалась с применением преобразователя сигналов «Теркон», производства «Термэкс» (г. Томск).

Таблица 1

Характеристика грунтов на площадке

Тип грунта	Влажность, д. ед.	Глубина, м
Суглинок засоленный	0,3–0,4	0–1,5 м
Пески пылеватые засоленные	0,3	1,5–3 м
Пески слабольдистые	0,3	от 3 м и ниже



Рис. 2. Процесс проведения эксперимента

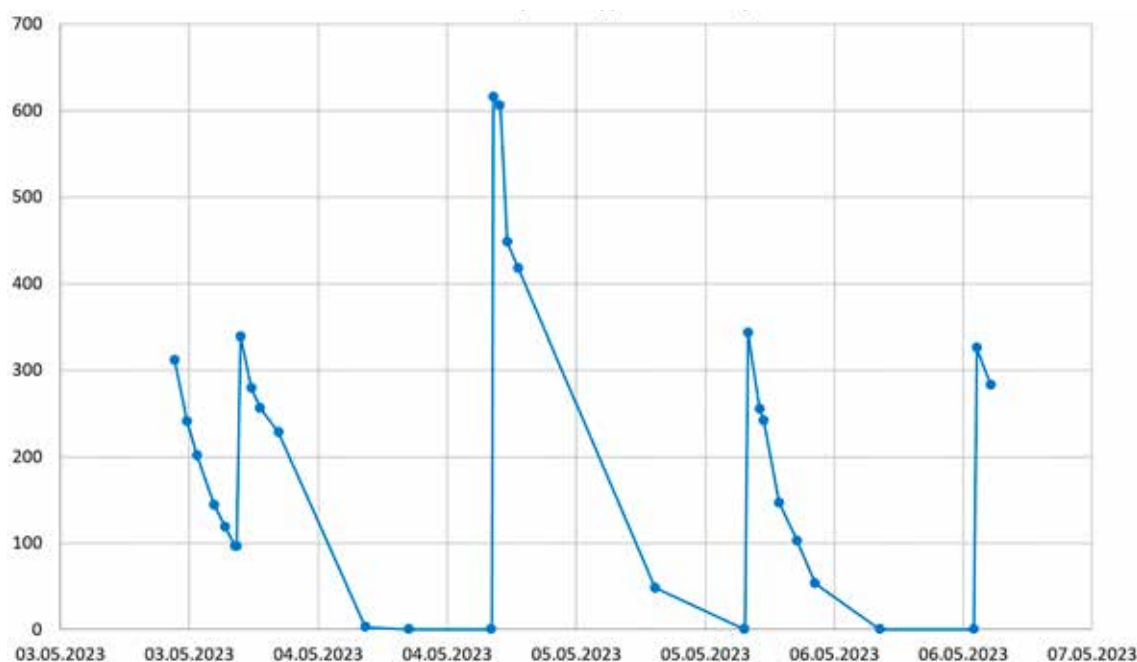


Рис. 3. Данные замеров высоты загрузки сухого льда в охлаждающей скважине

Таблица 2

Этапы загрузки криоагента в охлаждающую скважину

Загрузка	Время	Масса, кг
1	03.05.2023 10:40	19
2	03.05.2023 16:47	19
3	04.05.2023 16:20	20
4	05.05.2023 15:58	22
5	06.05.2023 13:15	20

Результаты исследования и их обсуждение

Охлаждающее воздействие производилось в течение 4 суток, всего было загружено около 100 кг в 5 этапов. На рис. 3 представлены результаты замеров столба сухого льда в охлаждающей скважине.

Разница в высоте столба сухого льда в скважине объясняется большой разницей в плотности криоагента. Масса использованного криоагента и время загрузок представлены в табл. 2.

В целом кривую расхода сухого льда по времени можно аппроксимировать в виде полинома третьего порядка (красная линия на рис. 4).

Регистрация температуры грунта проводилась в течение охлаждающего воздействия и далее в общей сложности в течение 15 суток.

Анализ данных регистрации температуры грунта (рис. 5, 6) показывает, что пик

воздействия на расстоянии 750 мм от охлаждающей скважины приходится на 4 сутки после начала охлаждения, максимальное понижение температуры в этот момент составило 0,88 °С. Затем, после прекращения охлаждающего воздействия максимальная разница температур к моменту завершения наблюдений составляет 0,35 °С. К завершению замеров устойчивое понижение температуры наблюдается на глубинах от 6 до 10 м. Среднее значение понижения температуры на данном диапазоне составляет 0,28 °С.

На расстоянии 1500 мм максимальное изменение температуры на глубине 9 м (-0,25 °С) устанавливается на 8 сутки после начала охлаждения и далее остается практически неизменным. К завершению замеров устойчивое снижение температуры грунта здесь наблюдается на глубинах от 7 до 10 м и составляет в среднем составило 0,1 °С.

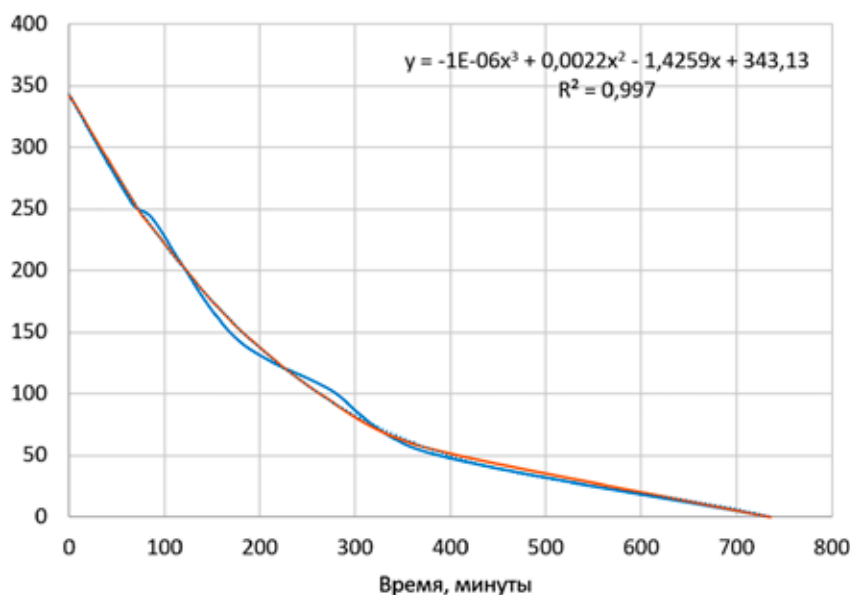


Рис. 4. Кривая расхода сухого льда

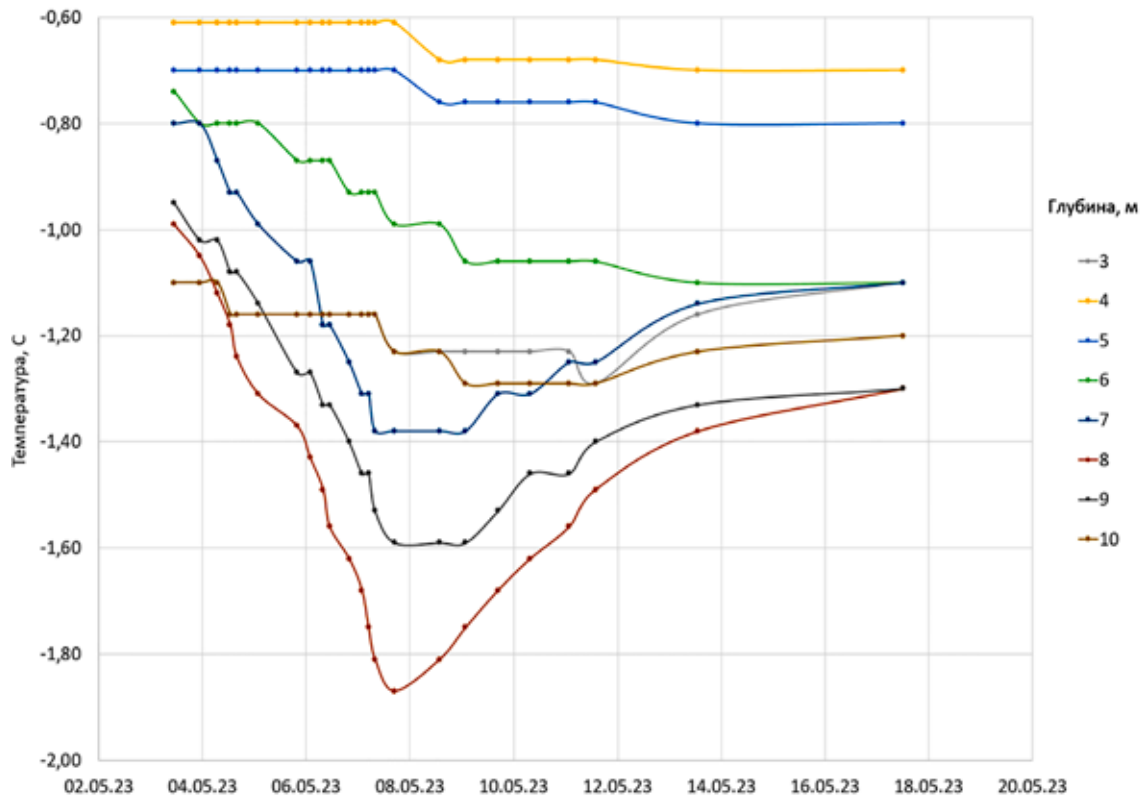


Рис. 5. Изменение температуры на различной глубине по времени на расстоянии 750 мм от охлаждающей скважины

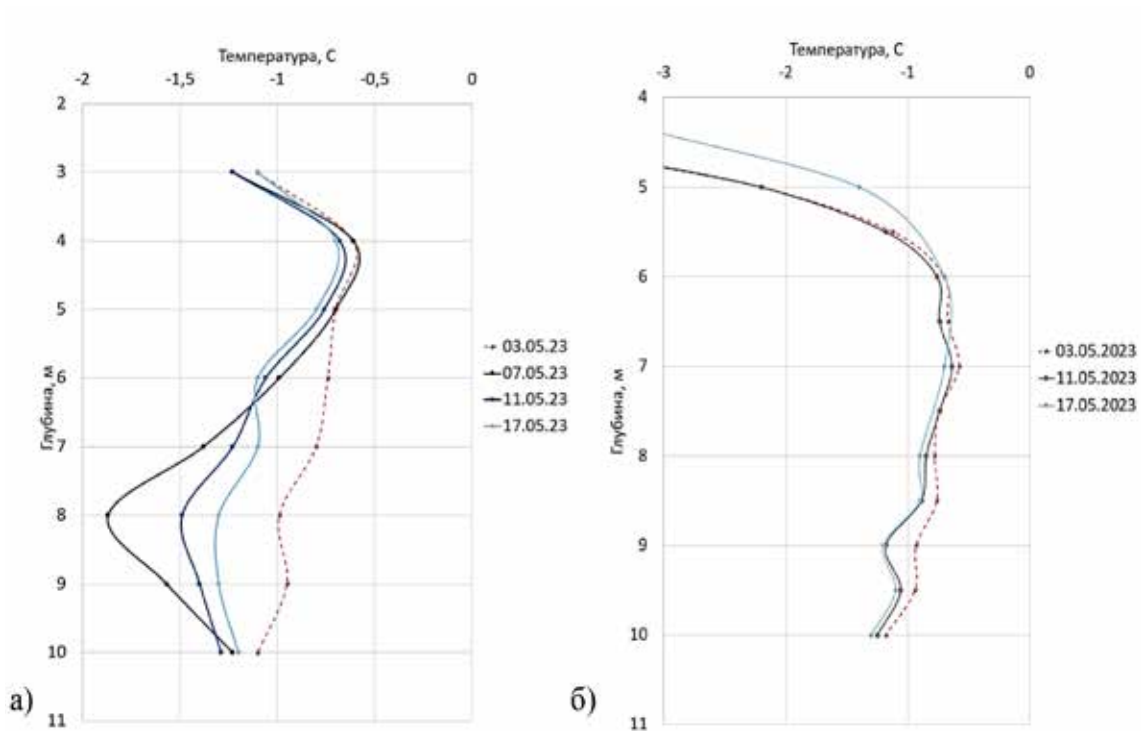


Рис. 6. Профили температуры грунта на расстоянии 750 мм от охлаждающей скважины (а) и на расстоянии 1500 мм от охлаждающей скважины (б)

Заключение

Технология охлаждения грунта с применением в качестве криоагента твердого диоксида углерода используется в основном для быстрой заморозки грунта и образования низкотемпературных ледогрунтовых ограждений и слоев при строительстве подземных сооружений и коммуникаций (подземные автостоянки, инфраструктура метрополитена, коллекторы).

Как показывают данные, полученные в ходе натурального эксперимента, в условиях Якутска испытываемая технология для целей понижения температуры грунтов оснований, даже при использовании единичной охлаждающей скважины на протяжении непродолжительного времени воздействия (4 суток), дает неплохой результат. Температурный режим грунтов Якутии характеризуется более низкими значениями в отличие от высокотемпературных грунтов регионов применения данной технологии (с температурой порядка +10 °С) и при заморозке талых грунтов основной расход сырья идет на обеспечение фазового перехода поровой влаги. В случае охлаждения уже мерзлого грунта расход криоагента будет относительно низким, но при наличии талых зон в охлаждаемом массиве расход криоагента будет значительно увеличиваться.

Таким образом, можно сделать вывод, что испытанный метод является перспективным для быстрого восстановления нарушенного в ходе строительных работ температурного режима грунта в условиях Республики Саха (Якутия). На данный момент основным ограничивающим фактором для применения данной технологии на сегодняшний день является дороговизна и ограниченный объем производ-

ства твердого диоксида углерода у местных поставщиков.

Список литературы

1. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Садуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15–30.
2. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Остарков Н.А., Фалалева А.А., Шелков Я.Ю. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2021. № 1. С. 14–31.
3. Бердников Н.М., Малкова Г.В., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Гравис А.Г., Пономарева О.Е. Прогнозная карта температуры многолетнемерзлых пород в криолитозоне России // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН (Якутск, 28–30 сентября 2020 г.). Якутск: Издательство ИМЗ СО РАН Якутск, 2020. С. 63–65.
4. Ефимов В.М., Васильчук Ю.К., Рожин И.И., Попенков Ф.Е., Степанов А.В. Моделирование температурного режима грунтовых оснований с сезоннодействующими охлаждающими устройствами в условиях криолитозоны Республики Саха (Якутия) // Арктика и Антарктика. 2017. № 4. С. 86–97.
5. Шуплик М.Н., Борисенко В.Н. Технология искусственного замораживания грунтов с применением твердых криоагентов в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 8. С. 381–384.
6. Никифоров К.П., Киселев В.Н., Делпаны Е.А. Применение твердого холодоносителя («сухого льда») для искусственного замораживания // Подземное пространство мира. 2000. № 3. С. 24–28.
7. Николаев П.В. Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов в городском подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 2. С. 367–371.
8. Николаев П.В. Совершенствование технологии искусственного замораживания грунтов с использованием твердых криоагентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 10. С. 392–400.