

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ /  
HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY**

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.40.1>

**ЛЕДОВЫЕ ОСТРОВА, СХЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ**

Научная статья

**Андреева С.А.<sup>1</sup>, Шарапов Д.А.<sup>2,\*</sup>**

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0001-8650-2375;

<sup>1</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (sharapov.dm[at]gmail.com)

**Аннотация**

Арктические морские регионы привлекают все больше внимания в контексте разведки и добычи энергетических ресурсов. Стремление к освоению этих территорий привело к разработке инновационных концепций, таких как ледовые острова и искусственно намороженные основания. В статье рассматриваются преимущества и вызовы, связанные с использованием этих гидротехнических решений для разведки в условиях арктических морей. Искусственные ледовые острова и платформы позволяют преодолеть технические и климатические ограничения для разведочного бурения. С увеличением толщины естественного ледового покрова обеспечивается устойчивость платформ и оборудования. Разведка в арктических условиях требует минимального воздействия на окружающую среду. Использование ледовых островов и платформ представляет перспективное решение для добычи энергетических ресурсов в арктических морях. Однако необходимо учитывать технические, экологические и социальные аспекты при разработке и реализации подобных проектов. Успешное освоение арктических ресурсов зависит от научных и инженерных достижений, сотрудничества и ответственного подхода к уникальной природной среде.

**Ключевые слова:** Арктика, ледовые острова, искусственно намороженные основания, гидротехнические сооружения, нефтегазовая промышленность.

**ICE ISLANDS, SCHEMES AND SPECIFICS**

Research article

**Andreeva S.A.<sup>1</sup>, Sharapov D.A.<sup>2,\*</sup>**

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0001-8650-2375;

<sup>1</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (sharapov.dm[at]gmail.com)

**Abstract**

Arctic marine regions are attracting increasing attention in the context of energy exploration and extraction. The pursuit of developing these areas has led to the development of innovative concepts such as ice islands and artificially frozen bases. This article discusses the benefits and challenges associated with the use of these hydraulic solutions for exploration in the Arctic seas. Artificial ice islands and platforms overcome technical and climatic limitations for exploration drilling. As the thickness of the natural ice cover increases, the stability of platforms and equipment is ensured. Exploration in Arctic conditions requires minimal environmental impact. The use of ice islands and platforms represents a promising solution for the extraction of energy resources in the Arctic seas. However, it is necessary to take into account technical, environmental and social aspects when developing and implementing such projects. Successful development of Arctic resources depends on scientific and engineering achievements, co-operation and responsible approach to the unique natural environment.

**Keywords:** Arctic, ice islands, artificially frozen bases, hydraulic structures, oil and gas industry.

**Введение**

В условиях повышающегося спроса к энергетическим ресурсам и необходимости добычи нефти и газа в отдаленных и экстремальных районах нашей планеты, особое внимание заслуживают арктические морские пространства. Разведочное бурение в таких регионах стало вызовом и в то же время неизбежным этапом в эволюции мировой нефтегазовой промышленности. В поиске инновационных решений для освоения богатств под арктическими водами, инженеры и ученые обратили свой взор к смелым концепциям, в числе которых выделяются ледовые острова и искусственно намороженные основания/платформы. Одним из ключевых аспектов данной концепции является толщина ледового покрова. Для обеспечения устойчивости и безопасности на искусственных островах и платформах, толщину естественного ледового покрова увеличивают до 5-8 метров. Это позволяет создать надежную платформу для размещения оборудования и инфраструктуры. "Panarctic Oil" разработала и построила более 20 плавающих ледовых платформ на глубинах более 200 метров. Конструирование и строительство подобных сооружений занимает около 60 дней, что подчеркивает высокую скорость реализации этой технологии. На мелководных глубинах арктических морей применяется создание ледовых островов, которые затем устанавливаются на дно. Эти структуры, спроектированные для работы в зимний период, сталкиваются с вызовами, связанными с сохранением своей устойчивости и функциональности в условиях летнего таяния льда. Несмотря на обширный опыт нефтегазовой промышленности в

освоении месторождений на континентальных шельфах, сложные климатические условия, экологические требования и отсутствие опыта в широкомасштабной эксплуатации в арктической зоне представляют значительные вызовы для инженеров и компаний, стремящихся освоить этот уникальный регион. Выбор морских гидротехнических сооружений для разведочного и эксплуатационного бурения в арктических условиях должен учитывать множество факторов, включая суровые природно-климатические условия, отдаленность от инфраструктуры, колебания уровня воды и возможность использования льда как строительного материала. Гибридные подходы, такие как искусственно намороженные платформы и ледовые острова, предоставляют перспективные решения для эффективной и безопасной разведки и добычи энергетических ресурсов в арктической зоне.

### **Особенности конструкции**

Для выполнения разведывательных буровых работ в шельфовой зоне арктических морей возможно применение искусственно созданных гидротехнических ледовых сооружений: ледовые острова и платформы, формируемые на поверхности ледового покрова. Для их строительства необходимо увеличение толщины естественного льда до 5-8 метров, обеспечивая тем самым надежную основу для размещения сооружений и оборудования. Примером успешной практической реализации такого подхода служит компания "Panarctic Oil", которая разработала и внедрила более двадцати плавучих ледовых платформ на глубинах свыше 200 метров. Осуществление подобных проектов занимает примерно 60 дней [1]. На небольших глубинах проектируют и внедряют ледовые острова, устанавливаемые на дно. Однако, такие сооружения используются только в зимний период, так как в летний период возникает проблема с обеспечением устойчивости к таянию льда. Продолжительность функционирования ледовых островов зависит от их способности сопротивляться растапливанию. Также ледовые острова должны сопротивляться горизонтальным нагрузкам от льда [2]. В сфере разработки морских нефтяных и газовых месторождений на континентальном шельфе в условиях незамерзающих морей имеется опыт отечественной и мировой нефтегазовой промышленности [3]. Однако в контексте арктических морей, характеризующихся суровыми условиями, накопленных технологий и специального оборудования для масштабных буровых и эксплуатационных работ пока недостаточно [4], [5], [6], [7]. Создание гидротехнических сооружений, включая ледовые острова, в сложных природно-климатических условиях арктических морей является одной из наиболее сложных научно-технических задач.

При принятии решения относительно типа морских гидротехнических конструкций, предназначенных для разведочного и эксплуатационного бурения, необходимо учесть следующие факторы:

Сложные условия природы и климата, включая долгие и суровые зимы, период полярной ночи, воздействие льда, геологическое строение донных отложений и присутствие многолетних мерзлых грунтов.

Отдаленность от индустриально развитых районов и основных транспортных магистралей.

Значительные колебания уровня воды, особенно в периоды паводков в устьях рек.

Возможность использования льда в качестве строительного материала и холода как фактора, способствующего более эффективному строительному процессу [8], [9], [10], [11].

Большая доля прогнозируемых запасов нефти и газа в арктических морях связана с мелководными акваториями, где плавучие буровые платформы (ПБУ) и гидротехнические сооружения не могут эффективно использоваться для поисково-разведочных операций. Существующие ПБУ предназначены для работы на глубинах свыше 15-20 метров и только в короткий период между ледоставом, что ограничивает возможности проведения поверхностных исследовательских скважин. Это особенно актуально для перспективных объектов с глубиной поисково-разведочных скважин 3000-3500 метров.

Для осуществления разведочных бурений в таких условиях предпочтительны ПБУ с небольшой осадкой и специальным ледостойким исполнением, способным выдерживать нагрузки от ледяных полей толщиной до 2 метров и давления до 1300-1500 тонн на квадратный метр поверхности контакта. Тем не менее, хотя обеспечение местной и общей прочности таких сооружений не представляет серьезных технических трудностей, достижение необходимой устойчивости при сдвиге практически невозможно и экономически невыгодно.

Массивные ледостойкие гравитационные платформы с большой грузовой осадкой также не подходят для мелководных арктических зон. В результате, единственной возможностью для круглогодичного проведения поисково-разведочных бурений в этих условиях являются искусственные островные сооружения, включая грунтовые, ледовые и ледогрунтовые острова. Эти сооружения обладают высокой устойчивостью к нагрузкам от льда и демонстрируют надежность, однако грунтовые острова ограничены по длительности использования. Грунтовые острова могут быть намывными или насыпными, и их устойчивость зависит от стабильности и защищенности откосов. Визуальные примеры ледовых островов приведены на рисунках 1-3.

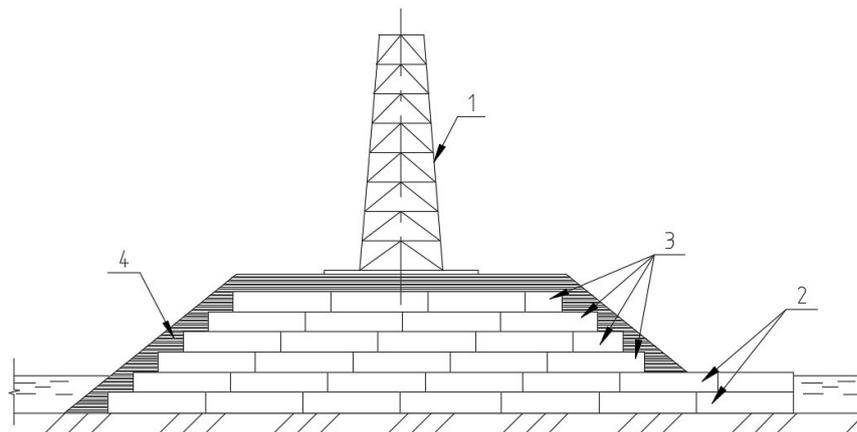


Рисунок 1 - Схема ледового острова из ледяных плит  
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.40.1.1>

Примечание: 1 — башенная конструкция; 2 — подводная часть ледяных плит; 3 — надводная часть ледового острова; 4 — защитный слой

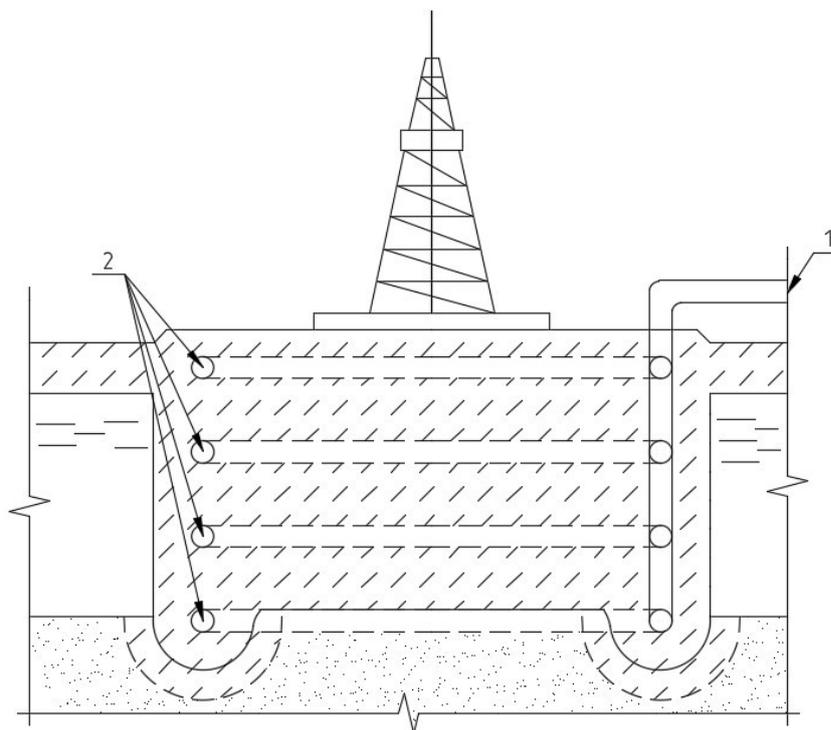


Рисунок 2 - Схема примораживания ледового острова ко дну моря  
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.40.1.2>

Примечание: 1 — соединение с хладоисточником; 2 — трубообразные элементы

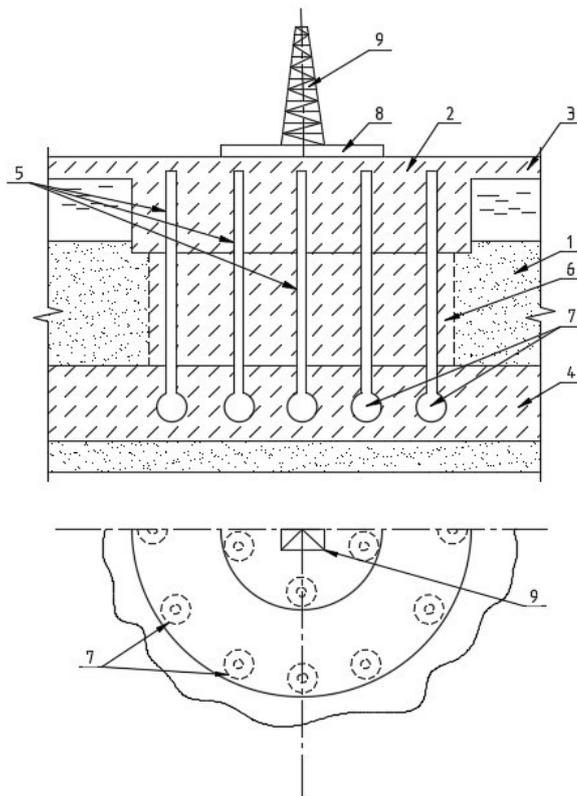


Рисунок 3 - Общая схема использования холодообмена ледового острова и вечной мерзлоты  
DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2023.40.1.3>

*Примечание: 1 — дно моря; 2 — ледяной монолит; 3 — ледяное поле; 4 — вечномерзлый слой; 5 — шурфы; 6 — ледогрунтовый слой; 7 — внутренние полости; 8 — основание буровой установки; 9 — буровая установка*

Стоимость грунтовых сооружений зависит от длины, уклона откосов и местоположения добычных площадок. В начальный этап поисково-разведочных работ наблюдается низкая эффективность, и также стоит учитывать расходы на демонтаж грунтовых сооружений. В целях оптимизации расходов целесообразно рассмотреть возможность возведения ледогрунтовых и ледовых островов. Ледогрунтовые острова представляют собой ледовые платформы, окруженные грунтовой обводненной площадью и замороженные до контакта с дном моря.

При росте глубины вод в зоне строительства, удаленности от грунтовых карьеров, использовании специальных устройств и систем защиты от размыва и воздействия льда, стоимость грунтовых и ледогрунтовых островов может значительно возрасти, что сделает эти сооружения экономически нецелесообразными. В связи с этим для эффективного проведения разведывательных бурений в суровых ледовых условиях, присущих мелководным областям арктических морей, более оптимальным вариантом гидротехнических конструкций будут искусственные ледовые сооружения.

#### **Преимущества и недостатки ледовых островов**

Экономическая выгода: например, платформа «Хекла-52» от компании Panarctic стоит 2 миллиона долларов при толщине льда в 3 м. Ледовый остров с высотой 18 метров, диаметром 120 метров и глубиной 9 метров обходится менее чем за 5 миллионов долларов. Создание искусственного острова с наполнителем в водах глубиной от 3 до 6 метров обойдется в диапазоне от 3 до 11 миллионов долларов. Такие острова не требуют сложного оборудования и используют морскую воду как материал.

Экологическая выгода: стоит отметить, что в настоящее время регулирующие органы имеют право требовать удаление острова с наполнителем из моря Бофорта по окончании бурения, если промышленные запасы не обнаружены. Процедура удаления может обойтись дороже, чем его создание. При необходимости, ледовый остров можно растопить или уничтожить непосредственно на месте, с минимальным воздействием на окружающую среду.

Переход к строительству ледового острова требует короткого предварительного периода, в то время как подготовка к созданию острова с грунтовым наполнителем может занять от 3 до 24 месяцев, а проектирование и доставка конических конструкций потребуют от 3 до 5 лет. Участки в море Бофорта предоставляются в аренду на 5 лет.

Ледовые острова подходят для использования в мелководных районах и предоставляют возможность для бурения только в зимний период. Быстрое намораживание льда ведет к его меньшей прочности, так как тепловая энергия не успевает диссипироваться в атмосфере и поглощается самим ледовым островом.

Строительство на ледовых островах ограничивается зимним сезоном. В летний период остров может растаять. Однако в случае обнаружения коммерческой залежи невозможно превратить его в эксплуатационную платформу.

Необходимость обеспечения сохранности ледовых островов в летний период может способствовать их созданию в глубоководных районах. Следует также исследовать возможность преобразования ледовых островов в эксплуатационные платформы. При этом важно учитывать климатические условия, устойчивость острова к скольжению по дну моря и прочность искусственного льда. Ограничение глубины вод также актуально, так как создание искусственного льда определенной толщины возможно только за одну зиму.

### **Заключение**

Исследование и освоение арктических морей представляют собой сложное взаимодействие между технологическими инновациями, природой и экологическими аспектами. Ледовые острова и искусственно намороженные платформы становятся важными элементами в поиске устойчивых и безопасных способов разведки и добычи энергетических ресурсов в этом уникальном регионе. Однако, несмотря на их потенциал, предстоит преодолеть ряд вызовов и учесть важные аспекты.

Первоочередной задачей является разработка технологических решений, способных справиться с экстремальными природно-климатическими условиями арктических морей. Устойчивость к ледовым нагрузкам, экологическая безопасность и способность сохранять функциональность в течение всего цикла бурения и эксплуатации становятся критически важными требованиями.

Другой существенной проблемой является учет экологических последствий при освоении арктических морей. Воздействие на уникальную природную среду этого региона требует тщательного анализа и контроля. Искусственные острова и платформы должны обеспечивать минимальное воздействие на морскую фауну, флору и геологическую структуру.

Специалисты и ученые также сталкиваются с задачей создания инфраструктуры для поддержания деятельности на ледовых островах и платформах в условиях длительных зим и обширных пространств. Поставки необходимых материалов, обеспечение безопасности персонала, поддержание оборудования в рабочем состоянии — все это требует инновационных решений и тщательного планирования. Подобные инженерные решения также должны учитывать социальные и экономические аспекты. Воздействие на местное население, создание рабочих мест, обеспечение гарантированных и безопасных условий труда — все это является неотъемлемой частью успешной реализации проектов в арктической зоне.

### **Финансирование**

Проект выполняется при поддержке Минобрнауки России, «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования (FSEG-2020-0021)».

### **Funding**

This work was done as a part of Project "Study of statistical patterns of ice loads on engineering structures and development of a new method for their stochastic modeling (FSEG-2020-0021)", No. 0784-2020-0021» supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

### **Конфликт интересов**

Не указан.

### **Conflict of Interest**

None declared.

### **Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### **Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### **Список литературы / References**

1. Мирзоев Д.А. Морские нефтегазопромысловые ледовые сооружения для освоения шельфа Арктики / Д.А. Мирзоев, Ф.Д. Мирзоев — М: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. — 144 с.
2. Gold L.W. The Habbakuk Project – Building Ship from Ice / L.W. Gold. — Issue 1. — Lulea, Sweden: POAC'89, 1989. — p. 1211-1228.
3. Sharapov D. Evolution of Ice Load Prediction Tools for Hydrotechnical Construction / D. Sharapov // E3S Web of Conf. — 2023. — 402. DOI: 10.1051/e3sconf/202340205023.
4. Бубырь А.А. Термический режим портовых гидротехнических сооружений / А.А. Бубырь // Вопросы ледотермики, труды транспортно-энергетического институт, Академия наук СССР Сибирское отделение/Издательство сибирского отделения. — 1961. — 12.
5. Шарапов Д.А. Термодинамическая модель ледового воротника в гидротехническом строительстве / Д.А. Шарапов, Ю.С. Клочков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2023. — 25 (3). — с. 107-113. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113.
6. Марчук А.Н. Перекрытие рек под ледяным покровом / А.Н. Марчук — М: Энергия, 1973. — 100 с.
7. Pronk A.D.C. The Calculation and Construction of a 30 Meter Span Ice Dome / A.D.C. Pronk, A. Borgart, J.M. Hijl, R.M.F. Pluijmen // Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints", Brasilia, Brazil. — 2014. — 1.

8. Борщук И.Л. Анализ возможных методов улучшения физико-механических свойств снега и льда в интервале температур, близкий к 0°C / И.Л. Борщук // Вестник научной информации Забайкальского филиала Географ. Общества СССР. — 1968. — 9. — с. 72-90.
9. Сазонов К.Е. Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег / К.Е. Сазонов — СПб: РГГМУ, 2007. — 195 с.
10. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский // Акад. наук СССР. Сев.-Вост. отд-ние Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева. — 1960. — 1. — с. 97-99.
11. Лотышева А.А. Экспериментальные исследования образцов льда армированного природными материалами / А.А. Лотышева, О.В. Якименко, А.А. Лунев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Омск, 25–26 ноября 2021 года. — 2021. — 1. — с. 325-330.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Mirzoev D.A. Morskije neftegazopromyslovyje ledovye sooruzhenija dlja osvoenija shel'fa Arktiki [Offshore Oil and Gas Field Ice Structures for the Development of the Arctic Shelf] / D.A. Mirzoev , F.D. Mirzoev — M: Gazprom VNIIGAZ, 2016. — 144 p. [in Russian]
2. Gold L.W. The Habbakuk Project – Building Ship from Ice / L.W. Gold. — Issue 1. — Lulea, Sweden: POAC'89, 1989. — p. 1211-1228.
3. Sharapov D. Evolution of Ice Load Prediction Tools for Hydrotechnical Construction / D. Sharapov // E3S Web of Conf. — 2023. — 402. DOI: 10.1051/e3sconf/202340205023.
4. Bubyr' A.A. Termicheskiy rezhim portovykh gidrotehnicheskikh sooruzhenij [Thermal Regime of Port Hydraulic Structures] / A.A. Bubyr' // Issues of Ice Thermals, Proceedings of the Transport and Energy Institute, USSR Academy of Sciences Siberian Branch / Siberian Branch Publishing House. — 1961. — 12. [in Russian]
5. Sharapov D.A. Termodinamicheskaja model' ledovogo vorotnika v gidrotehnicheskom stroitel'stve [Thermodynamic Model of an Ice Collar in Hydraulic Engineering] / D.A. Sharapov, Ju.S. Klochkov // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — 2023. — 25 (3). — p. 107-113. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113. [in Russian]
6. Marchuk A.N. Perekrytie rek pod ledjanym pokrovom [Blocking of Rivers under Ice Cover] / A.N. Marchuk — M: Energija, 1973. — 100 p. [in Russian]
7. Pronk A.D.C. The Calculation and Construction of a 30 Meter Span Ice Dome / A.D.C. Pronk, A. Borgart, J.M. Hijl, R.M.F. Pluijmen // Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium “Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints”, Brasilia, Brazil. — 2014. — 1.
8. Borschuk I.L. Analiz vozmozhnykh metodov uluchshenija fiziko-mehaničeskikh svojstv snega i l'da v intervale temperatur, blizkiz k 0°C [Analysis of Possible Methods for Improving the Physical and Mechanical Properties of Snow and Ice in the Temperature Range Close to 0°C] / I.L. Borschuk // Bulletin of Scientific Information of the Trans-Baikal Branch Geographer. Societies of the USSR. — 1968. — 9. — p. 72-90. [in Russian]
9. Sazonov K.E. Materialovedenie. Svojstva materialov. Metody ispytaniy. Led i sneg [Materials Science. Material Properties. Test Methods. Ice and Snow] / K.E. Sazonov — SPb: RGGMU, 2007. — 195 p. [in Russian]
10. Vojtkovskij K.F. Mehanicheskie svojstva l'da [Mechanical Properties of Ice] / K.F. Vojtkovskij // Acad. Sciences of the USSR. North-East Department of Institute of Permafrost named after V.I. V.A. Obruchev. — 1960. — 1. — p. 97-99. [in Russian]
11. Lotysheva A.A. Eksperimental'nye issledovanija obraztsov l'da armirovannogo prirodnyimi materialami [Experimental Studies of Ice Samples Reinforced with Natural Materials] / A.A. Lotysheva, O.V. Jakimenko, A.A. Lunev // Architectural-Building and Road Transport Complexes: Problems, Prospects, Innovations: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Omsk, 25-26 November 2021. — 2021. — 1. — p. 325-330. [in Russian]