

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 551.34

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(72-78)

**ТРИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА
НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ****Л.Н. Хрусталеv***Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; lev_kh@rambler.ru*

Рассматриваются проблемы, возникающие при хозяйственном освоении континентального шельфа арктических морей с целью разработки углеводородных месторождений. Предлагаются способы решения этих проблем с помощью новых конструкций ледовых и ледогрунтовых островов, а также добычных скважин, не оказывающих на вмещающую среду теплового влияния. Эти острова обеспечивают высокую надежность добычных работ и позволяют осваивать участки акватории на глубинах, ранее не доступных для стационарных стальных и железобетонных буровых платформ.

Арктика, шельф, углеводородные месторождения, хозяйственное освоение, надводный и подводный лед, ледогрунтовый остров, ледовый остров, добычная скважина

**THREE INNOVATION PROPOSALS FOR CONSTRUCTION
ON THE ARCTIC CONTINENTAL SHELF****L.N. Khrustalev***Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; lev_kh@rambler.ru*

The paper discusses construction related problems arising from the Arctic continental shelf development and relevant to exploitation of petroleum reservoir. The proposed solutions to these problems consist in the new designs for ice and ice-ground islands, and for producing wells exerting no thermal effect on the surroundings. These islands allow to maintain high safety of production operations and to develop offshore areas at depths not accessible by steel and concrete fixed platforms.

Arctic shelf, petroleum reservoir, economic development, sea ice and subaqueous ice, ice ground island, ice island, recovery well

ВВЕДЕНИЕ

Под континентальным шельфом понимается прибрежная зона морей от береговой линии до материкового склона, ширина которой обычно составляет около 200 км. Как известно, на шельфе находится значительная часть всех углеводородов Земли. Этим объясняется большой интерес, который в настоящее время проявляется во всех странах к его хозяйственному освоению. В России это прежде всего относится к освоению шельфа арктических морей: Баренцева, Белого, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского.

Главное отличие арктического шельфа от остальных – наличие льда, надводного и подводного. Последний сосредоточен ниже дна моря в толще грунтовых отложений, которые принято называть многолетнемерзлыми породами (ММП). Они захватывают всю береговую полосу, а в последний климатический и криогенный минимум (20–18 тыс. лет назад) распространились в сторону моря на 600–800 м. Около 15 тыс. лет назад нача-

лась последняя трансгрессия моря. Перекрываемые морской водой сформировавшиеся ММП начали деградировать. К настоящему времени деградация привела к сохранению в западном секторе Арктики лишь относительно небольших массивов и островов реликтовых мерзлых пород. В восточном секторе мерзлые породы распространены значительно шире [Неизвестнов и др., 2005]. Однако и здесь мощность ММП не одинакова, у берега она больше, составляет примерно 600–800 м, а в сторону моря убывает до нуля. При этом ее кровля расположена непосредственно под дном моря или на некоторой от него глубине, порядка 10–20 м [Дмитренко и др., 2001].

Наличие льда создает большие проблемы при хозяйственном освоении шельфа. Надводный лед, дрейфуя под действием ветра и течений, оказывает давление на гидротехнические сооружения, превышающее штормовые давления волн при ураганных ветрах. Так, измеренные значения давле-

ний на гидротехнические сооружения, расположенные в открытом море, составляют 2 кПа для ветра, 96–144 кПа для волны, и 2880 кПа для перемещающихся ледовых полей. Известны случаи переворота буровых стационарных платформ из-за навалов льда. Подводный лед формирует особые свойства породы, зависящие от ее температуры и засоленности. А поскольку добываемый из земли флюид (нефть или газ) имеет высокую положительную температуру, со временем происходит растепление мерзлых грунтов оснований гидротехнических сооружений, которое в сочетании с действием надводного льда приводит к потере их устойчивости.

Самыми устойчивыми сооружениями на шельфе являются грунтовые острова, используемые для бурения на нефть и газ. Они состоят из трех частей: подводной, надводной и защитного парапета. Чаще всего подводная часть создается односторонним намывом и имеет незакрепленный пляжный откос крутизной от 1:15 до 1:20; надводная – насыпным способом с закрепленным откосом крутизной от 1:3 до 1:5; защитный парапет возводится из камня или мешков с песком в виде призмы с крутизной откоса 1:2. Комбинированные откосы (сочетание намывных и насыпных откосов) имеют преимущества над остальными, так как малые глубины на пологих подводных откосах летом способствуют разрушению морских волн (по пути вдоль откоса их высота уменьшится и большая часть энергии теряется), а зимой – разрушению напояющих на остров ледяных полей с образованием защитного пояса из битого льда.

В качестве крепления откоса надводной части обычно используются синтетические полипропиленовые мешки с песком или гравием объемом 0.4–2.0 м³, иногда мешки с цементным раствором (1 часть цемента и 4 части инертных), поверх которых укладываются стальные тросовые сети и якорные цепи (для удержания элементов покрытий). Под крепление укладывается фильтр (геотекстиль) [Джефриз и др., 1985].

Грунтовые острова по своему назначению подразделяются на разведывательные и эксплуатационные. Разведывательные острова имеют относительно небольшой срок службы (до 3 лет), эксплуатационные – до 30 лет. Конструктивные параметры островов зависят от климатических, гидрографических, гидрологических, геологических и мерзлотных условий района их расположения и определяются расчетом [Соколов, 2003]. В качестве примера приведем некоторые расчетные данные для островов, расположенных в море Бофорта на глубинах до 10 м, где они впервые были возведены.

Разведывательный остров:

– принимается круглая форма острова в плане с диаметром рабочей площадки 122 м;

– возвышение территории острова над уровнем моря 3.4 м;

– высота защитного парапета (бермы) не менее 1.5 м.

Эксплуатационный остров:

– размеры острова в плане определяются оборудованием и технологией работ, обычно диаметры островов равны 183 м (в общем случае от 183 до 305 м);

– возвышение территории острова над уровнем моря 4.6 м;

– высота защитного парапета не менее 2.4 м.

Несмотря на высокую надежность, грунтовые острова из-за большого объема строительного материала получили распространение только на мелководье. С увеличением глубины моря они по своим экономическим показателям уступают стальным и железобетонным стационарным платформам. Граница раздела проходит примерно на глубинах 10 м. По мнению автора, эту границу можно существенно сдвинуть в сторону моря, если использовать в качестве строительного материала островов материал, который имеется в Арктике в избытке, а именно, морской и континентальный (пресноводный) лед.

Лед является хорошим строительным материалом и часто используется в качестве цементующего при создании зимних фортификационных сооружений из грунта. Однако лед обладает и отрицательным свойством – пластическими деформациями, которые проявляются даже при малых нагрузках, в том числе под действием собственного веса [Войтковский, 1954]. В результате этого большинство конструкций из льда непрерывно деформируется и, не разрушаясь, меняет очертания. Эти деформации обычно не позволяют полностью использовать прочность льда, поэтому основным критерием устойчивости конструкций из таких материалов становятся не их прочностные характеристики, а параметры ползучести и уплотняемости. Конструкции и сооружения из льда считаются деформативно устойчивыми в том случае, когда конечные деформации за расчетный период эксплуатации сооружения не превышают допустимых величин. Конечная деформация объема ледяной конструкции (e) под действием внешней нагрузки и собственного веса за расчетный период времени складывается из начальной упругой деформации (e_{el}), деформации ползучести (e_t) и деформации уплотнения (e_c):

$$e = e_{el} + e_t + e_c.$$

С повышением отрицательной температуры деформации льда увеличиваются, а его прочность уменьшается.

Несмотря на указанные недостатки льда как строительного материала, он широко используется при возведении фортификационных сооруже-

ний и ледовых переправ через водные преграды. Что касается его применения при строительстве морских платформ, то это перспективное предложение не получило пока промышленного воплощения и находится на стадии опытного применения, проектной проработки или просто идеи. Некоторые идеи, разработанные автором на уровне изобретений, рассмотрены ниже. При этом необходимо отметить, что ледяные и ледогрунтовые острова, в отличие от стальных и железобетонных платформ, особо чувствительны к тепловому воздействию добываемого флюида. Поэтому их применение возможно только в том случае, если конструкция скважин будет полностью исключать поступление тепла в окружающую среду. Описание разработанной автором конструкции такой скважины также дано в настоящей статье.

ЛЕДОГРУНТОВЫЙ ОСТРОВ

Остров состоит из намороженного на обрезающую по периметру буровой платформы льдину морской воды, укрытую грунтом на величину мощности слоя сезонного оттаивания [Городецкий и др., 1984]. Вокруг подводной части ледяного тела и частично надводной на величину набега волны и наползания льда устроена грунтовая призма, в которую установлена замораживающая система в виде ряда сезонно действующих охлаждающих установок (СОУ), погружаемых через грунтовую призму в дно моря. Высота призмы принята равной высоте надводной части грунтового острова, включая защитный парапет (рис. 1).

Намороженное ледяное тело острова не имеет положительной плавучести, т. е. его надводная часть превышает глубину моря (с учетом наката волны) не менее чем на 1/6. В остальном ледогрунтовый остров удовлетворяет тем же требованиям, которые предъявляются к грунтовым островам. Дополнительно производится только расчет на деформативную устойчивость ледяного тела.

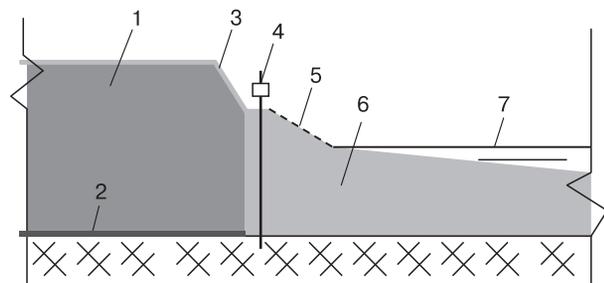


Рис. 1. Ледогрунтовый остров с комбинированным откосом.

1 – намороженный из морской воды лед (ледяное тело); 2 – обрезающая льдина из естественного льда; 3 – защитный слой грунта; 4 – охлаждающая система; 5 – крепление откоса; 6 – грунтовая призма; 7 – уровень моря.

При этом глубина моря, где возводится ледогрунтовый остров, соответствует не только экономической целесообразности строительства ледогрунтовых островов, но и возможностям естественного намораживания ледяного тела нужной высоты в конкретных метеорологических условиях за один морозный период.

Интенсивность тонкослойного намораживания льда из пресной воды можно оценить по формуле В.А. Бобкова [1977]. Расчеты, проведенные по формуле В.А. Бобкова, показали, что возможности намораживания льда за один морозный период на западе арктического побережья составляют от 15 до 35 м, на востоке – от 35 до 55 м [Сосновский и др., 2014]. При этом за морозный период принимается продолжительность года со средней температурой ниже -5°C . Интенсивность намораживания морской воды на 20 % меньше. Отсюда следует, что такой ледогрунтовый остров технически можно возводить в акваториях, где глубина моря не превышает 10–23 м на западе Арктики и 23–37 м на востоке.

Сооружение острова осуществляется следующим образом. На ледяном покрове намечают контур будущего сооружения (карту), по контуру карты делают прорубь (майну). На карту производят намораживание воды, которая образует ледяное тело. Под действием веса ледяного тела карта опускается на дно моря. Далее в майну насыпают песок, доставляемый с берега самосвалами по ледяному покрову или намываемый земснарядом, с образованием песчаной призмы, в центре которой устанавливают замораживающие колонки, с помощью которых призму смораживают с дном моря и поддерживают в мерзлом состоянии в период эксплуатации острова. Надводную часть ледяного тела покрывают слоем песка, превышающим глубину его сезонного оттаивания. Рассмотренная конструкция позволяет увеличить срок службы острова за счет снижения интенсивности термоабразии и термоденудации ее поверхности, увеличить сопротивляемость платформы сдвигу за счет ее срезания с дном моря и снизить требования к качеству намораживаемого льда за счет принятия большей части срезающих нагрузок призмой мерзлого песка.

Срок создания конструкции – один зимний сезон.

ЛЕДЯНОЙ ОСТРОВ

Ледяной остров представляет собой посаженный на дно моря айсберг. Айсбергом принято называть отколовшийся от ледника и сползший в море массив пресноводного льда, выступающий над водой на 5 м и более. В северных морях нередко встречаются айсберги как на открытой воде, так и в дрейфующем льду и припае. Первые представляют большую опасность для гидротехнических



Рис. 2. Айсберг – убийца морских платформ (фото неизвестного автора).



Рис. 3. Непотопляемый авианосец – военный аэродром на айсберге.

сооружений, их часто называют убийцами морских платформ (рис. 2).

Идея превратить айсберг из противника хозяйственной деятельности человека в союзника зрела давно. Впервые о ней заговорили во время Второй мировой войны (1942 г.). Тогда был разработан проект военного аэродрома на айсберге, который широко обсуждался в английских военных кругах, однако не был реализован. Этот аэродром выглядел примерно так, как показано на рис. 3.

В.Д. Смирновым, С.Э. Городецким и Л.Н. Хрустальевым [А.с. 914712, 1982] была предложена идея посадить айсберг на дно моря и использовать в качестве буровой платформы. Эта идея была признана изобретением. Учитывая, что отношение подводной части к надводной части массива пресноводного льда в морской воде составляет 87 %, глубины, которые можно будет перекрывать с помощью айсбергов, будут более 33,5 м. Вопрос заключается в том, где найти нужный айсберг, как его переместить к месту установки и как его посадить на дно моря. При этом для буровой платформы нужен будет не просто айсберг, а именно столовый, линейные размеры которого больше линейных размеров технологической площадки по крайней мере в 1,5 раза (запас на разрушение за время эксплуатации краев ледяного тела на воздухе и в воде). Как и где найти такой айсберг?

На Земле имеется несколько районов образования айсбергов: Гренландия, Новая Земля, Шпицберген, Северная Земля, Земля Франца-Иосифа, острова Канадского Арктического архипелага, Антарктида. Ежегодно выводные ледники Гренландии образуют 10–15 тыс. айсбергов от 0,4 до 1,6 млн т каждый. Наибольшие из них достигают длины 2 км при общей толщине 300 м. Нужный айсберг можно обнаружить с помощью спутника или самолета.

Следующая проблема – доставка айсберга к месту установки. В настоящее время в Канаде имеется практический опыт буксировки айсбергов с маршрутов судоходства и линий дрейфа, пересекающих места расположения морских платформ. Самый большой из отбуксированных айсбергов был длиной 112 м, шириной 85 м и общей толщиной 182 м. Его буксировал обычный грузовой корабль со скоростью 1 миля в час. В России буксировка айсбергов началась в 2016 г. Осенью этого года в Карском море был проведен эксперимент по буксировке айсбергов. По сообщению агентства РИА Новости от 10 октября 2016 г., ледоколом «Капитан Драницын» было отбуксировано 18 айсбергов, при этом самый крупный из них превысил 1 млн т.

Последняя проблема – посадка на дно моря. Для этого айсберг должен иметь осадку в воде несколько меньшую, чем глубина моря в месте установки. После буксировки его нагружают балластом и он садится на дно. Величина балласта должна обеспечивать не только отрицательную плавучесть айсберга, но и его устойчивость к действию горизонтальных нагрузок. В качестве балласта может использоваться лед, послойно намораживаемый из морской воды, или грунт со дна моря. Посадка айсберга на дно и его устойчивость могут быть достигнуты за счет изменения плавучести с помощью направленного взрыва [А.с. 1084364, 1984]. Эта идея реализуется следующим образом. На месте обнаружения направленным взрывом откалывается некоторый объем надводной части – айсберг всплывает, на месте установки – подводной части – айсберг частично теряет плавучесть и садится на дно. При этом, независимо от способа посадки на дно моря, дневная поверхность айсберга во избежание оттаивания ледяного тела покрывается слоем грунта на величину слоя сезонного оттаивания. Что касается бо-

ковых сторон айсберга, то их защита от разрушения на воздухе и в воде в результате процессов термоденудации и термоабразии практически невозможна, поэтому айсберг должен быть существенно больше технологической площадки на величину этих разрушений. Последняя зависит от метеорологических и гидрологических условий района посадки айсберга на дно и времени его эксплуатации. Эта величина определяется расчетом [Войтковский, 1954]. Общий вид айсберга в качестве буровой платформы приведен на рис. 4.

Преимущество айсберга в качестве буровой платформы по сравнению с другими конструкциями очевидно. Огромный массив пресноводного льда для своего создания не требует капитальных вложений, достаточно однороден по составу и строению, сохраняет прочность даже тогда, когда окружающий ледовый покров теряет ее вследствие летнего таяния. Благодаря огромной массе и запасу холода сидящий на дне айсберг за счет гравитационных сил и сил смерзания с дном моря сохраняет устойчивость при всех нагрузках и воздействиях, включая ледовые, ветровые и волновые. Так, наблюдения, проведенные С.Э. Городецким в Антарктиде [А.с. 1092241, 1991], показали, что даже в летние месяцы, в период таяния и наиболее интенсивных ледовых подвижек, посаженные морским течением на мель айсберги хорошо противостоят внешним воздействиям. Главная причина в том, что они состоят из пресноводного льда, который значительно прочнее морского. Что касается естественного таяния, то в высоких широтах оно незначительно: ледяные массивы обладают большим запасом холода. Измерения, проведенные в Антарктиде на базе «Дружная 1», показали, что температура айсберга, образованного из шельфового льда ледника Фильхнера, достигает -30°C . Большим преимуществом платформы является еще и то, что она позволяет осваивать глубины до 200 м и более.



Рис. 4. Айсберг – буровая платформа [Городецкий, Хрусталеv, 1991].

Таким образом, на сегодняшний день известно, где и как находить айсберги нужных размеров, как их буксировать и как осаживать на дно моря. Это, на наш взгляд, открывает широкие возможности для решения проблемы хозяйственного освоения арктического шельфа.

Скважина, не оказывающая теплового воздействия на вмещающую среду. Создание ледо-грунтового и ледового островов возможно только в том случае, если разведочные и добычные скважины не будут оказывать на входящий в состав острова лед и мерзлые грунты его основания теплового влияния. Такая конструкция скважины была разработана на геологическом факультете МГУ в 2015 г. (рис. 5) [Пат. 156025, 2015]. Конструкция скважины в пределах ледяного тела и многолетнемерзлого грунтового основания включает специальное устройство – зеротер, который аккумулирует все тепло, поступающее от транс-

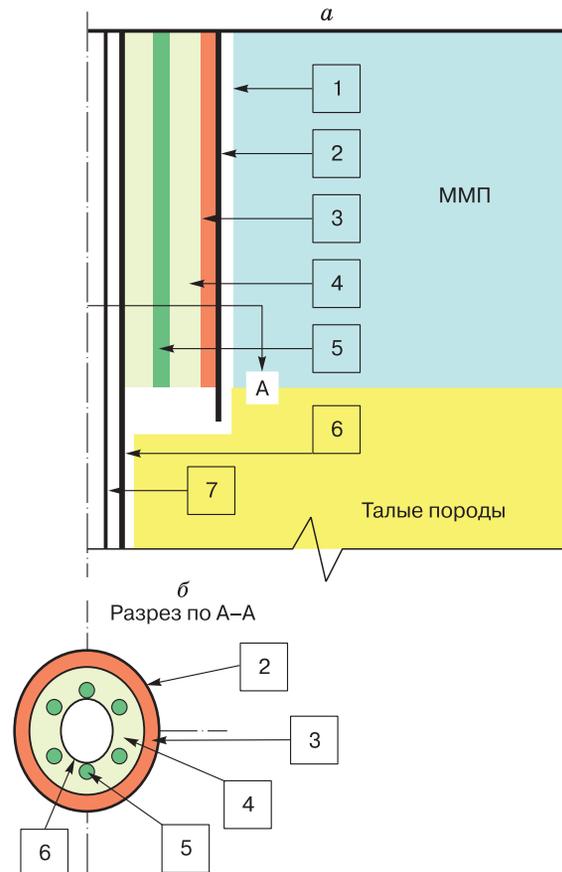


Рис. 5. Конструкция скважины, не оказывающей теплового влияния на вмещающую среду (вертикальный (а) и горизонтальный (б) разрезы скважины).

1 – цементное кольцо; 2 – промежуточная колонна; 3 – пористая резина; 4 – антифриз; 5 – замораживающая система; 6 – эксплуатационная колонна; 7 – лифтовая труба.

портируемого продукта в окружающую среду, и тем самым не допускает оттаивания льда и мерзлого грунта. Накапливаемое в зеротере тепло периодически удаляется холодильной машиной. Зеротер представляет собой цилиндрическую полость, расположенную между эксплуатационной колонной и кондуктором, заполненную антифризом – водным раствором этиленгликоля с отрицательной температурой фазового перехода. Внутри зеротера размещены охлаждающие колонки, замораживающие раствор. Во избежание деформации стенок зеротера при расширении раствора при замерзании на внутренней поверхности промежуточной колонны находится слой пористой резины, компенсирующий увеличение объема раствора при его замерзании. Аккумуляция тепла происходит за счет оттаивания раствора, после чего он вновь замораживается. Изменяя концентрацию раствора этиленгликоля, добиваются равенства температуры его оттаивания (замерзания) температуре вмещающей среды. В этом случае разность температур между скважиной и вмещающей средой будет равна нулю, а следовательно, нулю будет равен и тепловой поток в эту среду в течение всего времени промерзания или оттаивания раствора.

Цикл работы зеротера состоит из оттаивания раствора этиленгликоля под действием тепла от транспортируемого продукта и его замораживания холодильной машиной, при этом отношение времени замораживания раствора ко времени его оттаивания составляет менее 1:10. Включение и выключение холодильной машины производится автоматически. Циклы следуют один за другим, поэтому скважина не оказывает теплового влияния на вмещающую скважину среду в течение всего периода эксплуатации.

Затраты энергии и время замораживания антифриза в зеротере приведены в таблице. Замораживание антифриза ведется холодильными станциями холодопроизводительностью 204–640 кВт.

ВЫВОДЫ

Хозяйственное освоение Арктики требует больших усилий и материальных затрат, которые можно существенно сократить, если на службу поставить природные ресурсы Арктики, а именно мороз и лед. Таким образом можно значительно сократить затраты на строительный материал для гидротехнических сооружений и его транспортировку, а также обеспечить высокую надежность сооружений. Предложена новая конструкция скважины, которая позволяет осуществлять добычу углеводородов в акваториях арктических морей на ледяных и ледогрунтовых островах с высокольдистыми донными грунтами без опасности разрушения островов и разрыва буровых колонн скважин. Внедрение этих предложений в практику станет важным шагом технического прогресса при

Затраты энергии и время замораживания антифриза

Глубина погружения зеротера, м	Затраты энергии, кВт·ч	Время замораживания, ч
100	974	3
200	1974	6
300	2921	8
400	3894	11
500	4868	14

Примечание. В расчетах взята холодильная станция АВ-300/360 холодопроизводительностью 384 кВт.

освоении природных ресурсов труднодоступных районов.

Литература

- А.с. 1092241.** Способ возведения ледяной платформы / С.Э. Городецкий, Л.Н. Хрусталева, А.В. Садовский. Оpubл. 1984. Бюл. № 18.
Gorodetsky, S.E., Khrustalev, L.N., Sadovskiy, A.V., 1984. A method for constructing ice platform. A.C. No. 1092241, Byull. No. 18.
- А.с. 914712.** Способ создания ледяной опоры / В.Д. Смирнов, С.Э. Городецкий, Л.Н. Хрусталева. Оpubл. 1982. Бюл. № 13.
Smirnov, V.D., Gorodetsky, S.E., Khrustalev, L.N., 1982. Methodology for construction of ice foundation. A.C. No. 914712, Byull. No. 13.
- А.с. 1084364.** Способ создания ледяной опоры / В.Д. Смирнов, С.Э. Городецкий, Л.Н. Хрусталева. Оpubл. 1984. Бюл. № 13.
Smirnov, V.D., Gorodetsky, S.E., Khrustalev, L.N., 1984. Methodology for construction of ice foundation. A.C. No. 1084364, Byull. No. 13.
- Бобков В.А.** Производство и применение льда. М., Пищ. пром-сть, 1977, 230 с.
Bobkov, V.A., 1977. Production and Application of Ice. Pishchevaia promyshlennost, Moscow, 230 pp. (in Russian)
- Войтковский К.Ф.** Расчет сооружений из льда и снега. М., Изд-во АН СССР, 1954, 136 с.
Voitkovsky, K.F., 1954. Analysis of structures from ice. Izd-vo AN SSSR, Moscow, 136 pp. (in Russian)
- Городецкий С.Э., Хрусталева Л.Н.** Айсберг – буровая платформа // Наука в СССР, 1991, № 3, с. 96–99.
Gorodetsky, S.E., Khrustalev, L.N., 1991. Iceberg as a drill platform. Nauka v SSSR, No. 3, 96–99.
- Джефриз М.Дж., Роджерз Б.Т., Стьюарт Х.Р.** Строительство островов в канадской шельфовой зоне моря Бофорта // Тр. 17-й ежегодной конф. по морским технологиям (6–9 мая 1985 г.). Хьюстон, США, 1985, с. 131–140.
Jefferies, M., Rogers, B.T., Stewart, H.R., 1985. Island construction in the Canadian Beaufort Sea, in: Proceedings of the 17th Offshore Technology Conference (Houston, Texas, USA, May 6–9, 1985), pp. 131–140.
- Дмитренко И.А., Хьюлеманн Й.А., Кириллов С.А. и др.** Термический режим придонного слоя моря Лаптевых и процессы, его определяющие // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 40–55.
Dmitrenko, I.A., Hölemann, J.A., Kirillov, S.A., Wegner, C., Gribanov, V.A., Berezovskaya, S.L., Kassens, H., 2001. Thermal regime of the Laptev Sea bottom layer and affecting processes. Earth's Cryosphere V (3), 40–55.

Неизвестнов Я.В., Боровик О.В., Козлов С.А., Холмянский М.А. Поддонная криолитозона Баренцева, Карского и Белого морей // *Материалы Третьей конф. геокриологов России*. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 3, с. 184–190.

Neizvestnov, Y.V., Borovik, O.V., Kozlov, S.A., Kholmyansky, M.A., 2005. Subbottom permafrost of the Barents, Kara, and White Seas, in: *Proceedings of the 3rd Conference of Russian geocryologists*, Moscow University Press, Moscow, vol. 3, pp. 184–190. (in Russian)

Патент 156025. Устройство для ликвидации тепловых потоков от добывающей скважины в многолетнемерзлые породы / Л.Н. Хрусталева, Е.М. Чувиллин, А.Ю. Гунар. Опубл. 2015. Бюл. № 30.

Khrustalev, L.N., Chuvilin, E.M., Gunar, A.Y., 2015. A device for eliminating heat fluxes propagating from producing well into permafrost. Utility model patent No. 156025. Byull. No. 30.

Соколов В.Ф. Морские инженерные сооружения. Ч. I. Морские буровые установки. СПб., Судостроение, 2003, 535 с.

Sokolov, V.F., 2003. *Offshore engineering structures. P. I. Offshore drilling rigs*. Sudostroenie, St. Petersburg, 535 pp. (in Russian)

Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Физико-географические закономерности формирования искусственных фирново-ледяных массивов // *Лед и снег*, 2014, № 2 (126), с. 113–119.

Sosnovsky, A.V., Nakalov, P.R., Nenashev, S.V., 2014. Physical-geographical aspects of formation of artificial firn-ice massives. *Led i Sneg [Ice and Snow]* 2 (126), 113–119.

*Поступила в редакцию 23 мая 2018 г.,
после доработки – 26 ноября 2018 г.,
принята к публикации 27 ноября 2018 г.*