

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2020-6-119-130

УДК 622.692.4

Обзор и анализ развития способов оценки воздействий дрейфующих ледовых образований на подводные объекты

И. Г. Силина*, В. А. Иванов, Т. Г. Пономарева, С. В. Якубовская

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

*e-mail: i_g_silina@mail.ru

Аннотация. Богатый ресурсный потенциал Арктики обуславливает активное развитие и освоение данных территорий, в частности арктического континентального шельфа. Разработка шельфовых морских месторождений непосредственно сопряжена с необходимостью сооружения и эксплуатации подводных коммуникаций в условиях замерзающих акваторий, что поднимает вопросы, связанные с минимизацией экологических рисков, сокращением стоимости строительно-монтажных работ и обеспечением надежной эксплуатации морских подводных систем. Одними из наиболее значимых нагрузок на подводные системы в рассматриваемых условиях являются ледовые нагрузки, в особенности вызванные дрейфом торосистых образований. Деформации грунтового массива вблизи трубопровода могут вызвать в последнем недопустимые деформации в результате изгиба, что может привести к возникновению аварийных ситуаций. В работе рассматриваются основные аспекты ледового выпахивания, ретроспективное развитие способов исследования и оценки влияния ледовой экзарации на морские трубопроводные системы; приводится анализ существующих исследовательских подходов, рассматриваются их области применения и ограничения; приводятся дальнейшие направления исследований.

Ключевые слова: ледовая экзарация; ледовые образования; морские трубопроводы; смещение грунта

Analysis of the development of drifting ice formations impact on marine facilities assessment methods

**Irina G. Silina*, Vadim A. Ivanov, Tatyana G. Ponomareva,
Svetlana V. Yakubovskaya**

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*e-mail: i_g_silina@mail.ru

Abstract. The high resource potential of the Arctic determines the active exploration and development of these territories, in particular the Arctic continental shelf. The development of offshore fields is directly related to the issues of marine communications construction and operation in freezing waters. They are associated with minimization of environmental risks, reducing the cost of construction work, and ensuring reliable operation of underwater systems. The ice loads, especially, loads from ice gouging are considered one of the most significant loading conditions for such systems. Deformations of the soil around the pipeline during gouging may cause unacceptable deformations as a result of bending, which may lead to emergency situations. The article discusses the main features of ice gouging and the development of research and assessment methods for ice gouging impact on offshore pipelines. The article also provides the analysis of the research methods, their applications and limitations, and points out further research directions.

Key words: ice scour; ice features; marine pipelines; soil displacement

Введение

На сегодняшний день Арктика является регионом приоритетного развития для ряда государств, что преимущественно связано с высоким ресурсным, в частности нефтегазовым, потенциалом территорий. Согласно экспертным оценкам, запасы углеводородного сырья в Арктике оцениваются в размере 13 % неразведанных мировых запасов нефти и 30 % газа [1].

Крупные запасы углеводородов сосредоточены в области континентального шельфа, в связи с чем первостепенной является задача обеспечения стабильности морских и шельфовых нефтегазопроводов и нефтегазотранспортной системы в целом как составной части комплекса арктических инженерных систем. Вопрос изучения условий и особенностей функционирования инженерных сооружений, возводимых при освоении месторождений, является одним из наиболее актуальных для данного региона.

Арктика представляет собой трудноосваиваемые территории с экстремальными природными условиями, чувствительной экосистемой и уникальными природными явлениями; такой набор факторов с 30-х годов прошлого столетия обусловил постепенное развитие и становление теорий, способов и технологий, необходимых для успешного освоения данных территорий.

Освоение шельфовых месторождений Арктического региона привело к сооружению сети морских трубопроводов, подверженных воздействию множества геоклиматических факторов, среди которых можно выделить наиболее значимое явление с точки зрения обеспечения безаварийной и бесперебойной работы трубопроводных систем — ледовую экзарацию.

Проблемы изучения ледовой экзарации занимают важное место в истории развития способов прокладки арктических трубопроводов. Однако в вопросах изучения данного явления до настоящего времени отсутствует унифицированный подход, что обусловлено различием применяемых подходов и получаемых зарубежными и отечественными исследователями данных.

Объект и методы исследования

Всплеск интереса мировой общественности к исследованию арктического шельфа проявился в 1950-х и 1960-х годах. Первые детальные иссле-

дования особенностей подводного рельефа и природных условий были проведены на шельфах Чукотского моря и моря Бофорта (Rex, 1955; Carsola, 1954) [2]. Первоначальные обследования акваторий арктических морей носили ознакомительный характер и производились, в том числе, с водомерных постов: осуществлялись промеры глубин, определение мощности ледяного покрова, гранулометрии донных отложений и т. п. С конца 60-х годов, с началом активной разведки месторождений, большую значимость приобрело картографирование морского дна [3–8].

Картографирование морского дна включает проведение геофизических исследований с использованием труда водолазов на мелководье или с помощью бортовых приборов, таких как эхолоты и гидролокаторы бокового обзора, устанавливаемых под днищем судов. Данные, полученные при картографировании морского дна, внесли значительный вклад в представление научного сообщества о микрорельефе дна арктических морей, поскольку позволили выявить многочисленные линейные формы микрорельефа — результаты ледовой экзарации дна дрейфующими морскими льдами (рисунок).

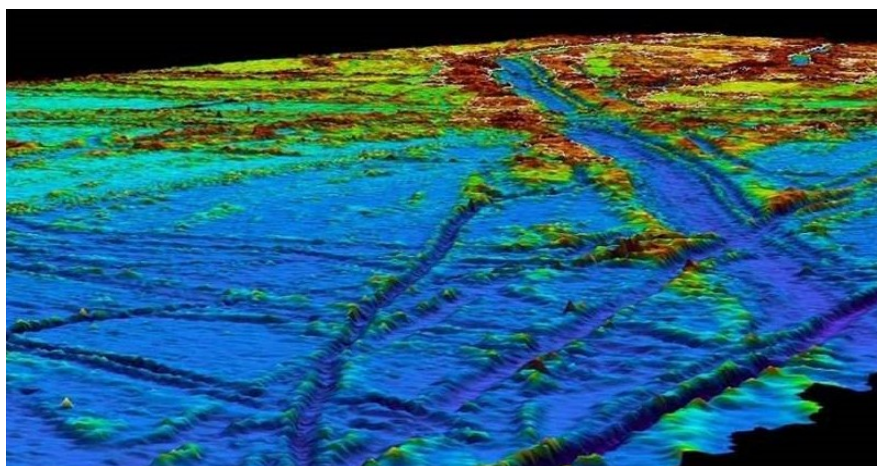


Рисунок. Картографирование морского дна с помощью многолучевого эхолота (USGS)

Разработка месторождений, добыча и транспортировка углеводородного сырья в данных условиях требуют значительных финансовых вложений, а также поиска практических решений для ряда технических, логистических и экологических проблем, что обусловило проведение комплексных исследований на арктическом шельфе. Исследования процессов, связанных с рельефообразующей деятельностью морских льдов, приобрели систематический характер, начиная с 70-х годов прошлого столетия. Активно проводились исследования литодинамики береговой зоны моря Бофорта (Barnes and Reimnitz, 1974; Reimnitz et al., 1977; Miller and Bruggers, 1980) и Чукотского моря (McManus et al., 1969; Winters and Lee, 1984; Miley and Barnes, 1986; Phillips et al., 1988). В начале 1980-х годов изыскания проводились и отечественными учеными на западной территории Советской Арктики, в Баренцевом и Карском морях, но носили преимущественно разведочный характер.

В приходящихся на данный период исследованиях впервые был описан ряд уникальных природных явлений, что послужило фундаментом для формирования представлений об особенностях взаимодействия дрейфующих льдов с береговой зоной арктических морей [9, 10]. Однако информация, полученная в результате исследований, включала в себя только глубину, ширину, длину и ориентацию борозд выпахивания.

Данные исследования позволяли формировать первоначальный подход к оценке явления ледовой экзарации, производимый на основании анализа данных картографирования морского дна. Входные данные позволяли применять методы статистической оценки (Льюис, 1977; Уикс и др., 1983, Лейнан и др., 1986 — экспоненциальное распределение с одним параметром; Нессим и Хонг, 1992 [11] — распределение Вейбулла), которые предсказывали максимально возможную и ожидаемую глубину борозд выпахивания.

В то же время такие методы были сопряжены с невозможностью учета литодинамических процессов и не обеспечивали необходимую степень точности получаемых данных. Применяемый статистический подход не позволял оценить воздействие смещаемых килем ледового образования слоев грунта на нижележащие сооружения и потому не мог составить основу методики оценки влияния ледового выпахивания на заглубленные сооружения, что важно для определения безопасной минимальной глубины заложения трубопроводов.

На протяжении десятилетий исследования процесса ледового выпахивания развивались по экстенсивному пути: происходили расширение границ обследованных территорий и постепенное накопление информации.

В Советском Союзе исследования взаимодействия морских льдов с дном и берегами носили опосредованный характер, поскольку изучение акваторий арктических морей было связано преимущественно с вопросами гидрометеорологического обеспечения судоходства [2]. Задача хозяйственного освоения территорий и возведения инженерных сооружений в прибрежной и шельфовой зонах не ставилась. Отдельные сведения были представлены в работах, посвященных изучению смежных вопросов геоморфологии, геологии, мерзлотоведения и т. д. [2–6]

В зарубежной научной среде наибольший вклад в эту область внесли канадские и американские ученые. Однако после 1981 года в связи с введением в США запрета на добычу нефти и газа на континентальном шельфе Тихого и Атлантического океанов произошло заметное снижение активности исследований, посвященных освоению прибрежных территорий. Тем не менее полученные к этому времени данные уже указывали на необходимость целенаправленного изучения явления ледового выпахивания, что привело к продолжению исследований в море Бофорта и Чукотском море (Rearic and McHendrie, 1983; Weber et al., 1989, Nessim and Hong, 1992; Myers et al., 1996; MMS 2002, 2008).

Причинами резкого роста интереса к данному феномену послужили факторы, связанные с открытием нефтяных месторождений вдоль северного побережья Аляски. С этого времени поиск решений по защите подводных сооружений от ледового воздействия приобрел особую значимость, поскольку обнаружение и устранение нефтяных разливов в условиях Арк-

тики являются крайне затруднительными. С дальнейшим освоением региона происходило постепенное развитие способов оценки влияния ледовой экзарации на морские сооружения. Накопление противоречий и выявление «белых пятен» в существующих теориях были связаны со следующими причинами:

- несовершенством техники и технологий, что приводило к выявлению погрешностей предшествовавших измерений при введении более современного оснащения;
- трудностью учета активности литодинамических процессов;
- практической невозможностью сбора данных со всей поверхности морского дна;
- почти полным отсутствием данных о параметрах рассматриваемых ледовых образований.

Вышеперечисленные факторы не обеспечивали достаточную точность получаемых данных, а также не позволяли производить определение ключевого параметра при проектировании подводных трубопроводных систем — деформации смещаемого килем ледового образования слоев грунта.

В 1972 году (W. L. Harrison) было проведено одно из наиболее ранних лабораторных исследований, связанных с ледовой экзарацией, целью которого было подтверждение общепринятой теории обрушения грунта с применением полей линий скольжения. Возросший интерес к данной проблематике привел к применению экспериментальных методов. Появившиеся методы физического моделирования позволяли не только верифицировать накопленные данные, но и варьировать параметры, изучение влияния которых прежде не представлялось возможным: геометрические параметры ледового образования, угол атаки киля, прочностные характеристики киля, характеристики грунтов и т. п. Кроме того, экспериментальные установки позволяли независимо исследовать влияние каждого параметра на характеристики борозд выпаживания, а также впервые вводить в модель подводные структуры — заглубленные трубопроводы или устья скважин. В то же время появилась необходимость в создании некоторой системы упрощений и допущений для идеализации условий и других параметров тестирования с целью получения надежных и воспроизводимых результатов испытаний.

Первым ученым, исследовавшим процесс ледового выпаживания с геотехнической точки зрения, был Т. R. Chari (1975–1982 гг.) [12–15]. В ходе осуществляемых им исследований проводились испытания для изучения механики процесса выпаживания и получения сведений о комплексной модели взаимного влияния ледового киля и грунта. В ходе экспериментов измерялись значения давлений и сил, действующих на модель, и смещений грунта в непосредственной близости от киля при выпаживании.

В 1981 и 1984 годах R. Abdelnour [11, 16] проводил серии испытаний с целью определения сопротивления грунта движению ледового киля. В 1984 году (K.S.R. Prasad) был проведен ряд экспериментов, посвященных выявлению влиянию формы ледового киля на сопротивление грунта при выпаживании. В ряде последующих исследований внимание уделялось не только сопротивлению грунта смещению, но и изучению факторов, обуславливающих механику движения ледового киля (Poorooshab et al., 1989;

Barker and Timco, 2002, 2003; Liferoov and Høyland, 2004; Vikse et al., 2007; Barrette et al., 2008, 2009; Sancio et al., 2011). Проведенные на этом этапе исследования привели к возникновению множества методик, применяемых для описания процессов взаимодействия дрейфующих ледовых образований с грунтом и заглубленными конструкциями.

Таким образом, проведение натурных и лабораторных экспериментов позволило более полно исследовать взаимодействие компонентов системы «ледовый киль — грунт — трубопровод». Развивавшийся подход к моделированию явления экзарации поставил перед исследователями ряд задач с целью определения минимально необходимой безопасной глубины заложения морских трубопроводов.

Впервые методы автоматизированного вычисления были применены к рассматриваемой области в 1990-х годах (C-CORE, 1995; Lach, 1996; Lach and Clark, 1996; Yang et al., 1993; Yang and Poorooshasb, 1997) при апробации метода конечных элементов для решения задачи определения сил сопротивления грунта и трубопровода смещению. Из-за ряда принятых допущений первые исследователи столкнулись с численными проблемами, вызванными серьезным искажением сетки.

Тем не менее анализ полученных результатов показал, что лагранжевое моделирование деформации грунта имеет хорошую сходимость с данными экспериментального моделирования.

Дальнейшие направления исследований были связаны с поиском оптимального способа решения сложных физико-математических задач, таких как:

- взаимодействие жидкости со структурой грунта [17];
- механика твердого тела и геомеханика при больших деформациях (Donea et al., 2004; Wang and Gadala, 1997);
- вопросы локализации напряжений и т. д.

Применение компьютерного моделирования для инженерного обеспечения нефтегазовой отрасли сыграло важную роль в решении проблемы сложного взаимодействия системы «ледовый киль — грунт — трубопровод». Проверка численных моделей, способных имитировать взаимодействие ледовой экзарации с нижележащими породами и заглубленными в донный грунт структурами, приобрела полуавтоматический характер (Kenney et al., 2007; Nobahar et al., 2007; Fredj et al., 2008; Eskandari et al., 2010, 2011; Eskandari et al., 2012).

Совершенствование технологий предоставило возможность автоматического построения пространственных моделей и визуализации большого числа возможных сценариев, что привело к сокращению трудозатрат в сравнении с реализацией экспериментальных методов лабораторного или полевого моделирования. Компьютерное моделирование обусловило возрастание скорости проведения массивных расчетов, а также способствовало внедрению и развитию качественно новых способов моделирования.

Однако возможности такого моделирования ограничены трудностью воспроизведения всех условий и учета всех факторов при разработке моделей, приближенных к реальным или к экспериментальным условиям [18, 19].

Связано это в первую очередь с необходимостью задания условий, нагрузок на грунт и трубопровод, а также значений ряда других параметров.

Также особенность компьютерного моделирования заключается в том, что оно не может выйти за пределы используемых исходных данных, что обуславливает зависимость достоверности результатов от адекватности задаваемых значений. Предшествующие исследования позволили откалибровать существующие численные модели, используя результаты не крупномасштабных экспериментов [20].

Результаты

В результате проведенного анализа хозяйственного освоения арктического шельфа в отечественной и мировой практике были выделены следующие основные этапы (табл. 1), которые соответствуют появлению и развитию способов оценки воздействий дрейфующих ледовых образований на подводные объекты.

Таблица 1

Этапы развития способов оценки ледовой экзарации

Этап	Основное содержание
1950–1970 гг.	Разведочный характер исследований, проведение первых инженерно-геологических изысканий, картографирование морского дна. Натурные исследования процесса ледового выпakhивания. Появление методов оценки влияния ледового выпakhивания на морское дно. Использование статистических методов для описания распределения и параметров борозд выпakhивания
1980–1990 гг.	Изучение ледового режима акваторий преимущественно с точки зрения обеспечения судоходства. Открытие нефтяных месторождений вдоль северного побережья Аляски. Задача возведения инженерных сооружений в прибрежной и шельфовой зонах не ставилась. Становление методов натурного и лабораторного физического моделирования ледовой экзарации, начало развития аналитических моделей
1990 г. — настоящее время	Сооружение первых шельфовых трубопроводов, приуроченных к месторождениям. Поиск решений по защите подводных сооружений от ледового воздействия. Появление компьютерного моделирования, усовершенствование аналитических моделей

Вышерассмотренные методы позволяют исследовать различные аспекты ледового выпakhивания, дополняя информацию, получаемую в процессе натурных изысканий. В рамках статьи была проведена оценка применимости тех или иных методов в отдельности к области проектирования, сооружения и эксплуатации нефтегазотранспортных систем в Арктической зоне; результаты проведенного анализа представлены в таблице 2, на основании которой можно выделить направления дальнейших исследований.

Особенности и применимость методов оценки ледовой экзарации

Метод	Преимущество	Ограничение	Область применения
Методы статистического анализа	Позволяют восполнять недостаток данных о параметрах распределения борозд выпахивания, возникающий в виду нерегулярности обновления баз данных исследований рельефа шельфов Арктических морей	Не учитывают фактор опасного воздействия деформаций в массиве грунта. Присутствуют погрешности проводимых инструментальных измерений, связанных с трудностью определения степени заносимости и возраста борозд выпахивания	Полученные в рамках статистического метода данные могут использоваться для оценки и выбора маршрута трасс подводных трубопроводов, а также в качестве входных данных для расчета необходимой величины заглубления подводных объектов
Методы экспериментального моделирования	Позволяют прицельно исследовать взаимодействие компонентов системы «киль — грунт — трубопровод»	Требуют преобразования полученных данных при экстраполяции на реальные объекты, что обуславливает возникновение некоторой погрешности, исходящей из допущений теории подобия	На основании полученных данных и зависимостей возможно дополнение аналитических моделей, обоснование значимости входящих в них факторов. Также методы физического моделирования могут дополнить данные картографирования в виду практической невозможности изучения динамики льдогрунтового взаимодействия в условиях натурных наблюдений ледового выпахивания
Аналитические модели	Позволяют получить упрощенные зависимости для описания процесса выпахивания, что делает их удобными для применения в инженерной практике	Меньшая точность в сравнении с имитационным моделированием. Невозможность полного воспроизведения процесса выпахивания	Могут составлять основу расчетных методик, используемых при проектировании и направленных на определение безопасной величины заглубления объектов для защиты от повреждения килем дрейфующих ледовых образований
Имитационное компьютерное моделирование	Позволяет в деталях воспроизвести процесс выпахивания морского дна килем ледовых образований, а также моделировать полную задачу, в которой требуется определить воздействие ледового выпахивания на заглубленный в грунт трубопровод	Существенно больший объем исходных данных, возрастают требования к их точности (достоверности). Трудность достижения установившегося режима выпахивания. Требуют значительных вычислительных ресурсов	Позволяет дополнять и уточнять аналитические модели, прогнозировать деформации грунта и трубопровода для различных сценариев и сочетаний нагрузок. Также может применяться для моделирования сценариев движения торосистых образований и определения безопасной величины заглубления трубопроводов

Все вышеперечисленное демонстрирует необходимость дальнейшей разработки оптимального подхода к оценке воздействия ледового выпakhивания на сохранность и устойчивость заглубленных конструкций.

Выводы

В условиях постепенно возрастающего интереса к освоению Арктического шельфа основные направления научно-исследовательской деятельности были связаны и остаются с получением прямых и косвенных данных о параметрах ледового выпakhивания, а также информации о вызываемых деформациях грунтового массива. На сегодняшний день наиболее актуальными являются вопросы поиска безопасных и экономически целесообразных решений для строительства и эксплуатации шельфовых трубопроводных систем, позволяющих снизить вероятность возникновения отказов. Таким образом, проанализировав и обобщив накопленный опыт изучения влияния ледовой экзарации на трубопроводные системы, был сделан вывод о взаимодополняемости применяемых методов, но при этом остаются открытыми многие вопросы прогнозирования поведения компонентов системы «киль — грунт — трубопровод».

В связи с чем в целях минимизации негативного влияния ледового выпakhивания на подводные трубопроводные системы и, как следствие, повышения их надежности, а также обеспечения экологической безопасности Арктической зоны предлагается дальнейшие исследования развивать в следующих двух направлениях:

- разработка методики определения минимально необходимой безопасной глубины заложения подводных трубопроводов (исследование характера распространения и величины грунтовых деформаций для определения нагрузок, передаваемых на заглубленные объекты; определение критерия минимально необходимой безопасной глубины заложения подводных трубопроводов);
- разработка трубопроводных конструкций повышенной надежности, позволяющих уменьшить необходимую величину заглубления (изменение жесткости конструкции; возможность применения многотрубных конструкций).

Библиографический список

1. Liferov, P. In-situ ice ridge scour tests : experimental set up and basic results / P. Liferov, K. V. Nøylund. – DOI 10.1016/j.coldregions.2004.06.003. – Текст : непосредственный // Cold Regions Science and Technology. – 2004. – Vol. 40, Issue 1–2. – P. 97–100.
2. Огородов, С. А. Рельефообразующая деятельность морских льдов : специальность 25.00.25 «Геоморфология и эволюционная география» : диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук / Станислав Анатольевич Огородов ; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2014. – 261 с. – Текст : непосредственный.
3. Вильнер Б. А. Особенности динамики берегов северных морей. В 4 т. Т. 4. Динамика и морфология берегов / Б. А. Вильнер. – Москва : АН СССР, 1955. – С. 384–396. – Текст : непосредственный.
4. Данилов, И. Д. Некоторые аспекты морской криологии литорально-шельфовой зоны / И. Д. Данилов, Л. А. Жигарев. – Текст : непосредственный // Географические проблемы изучения Севера : сборник статей. – Москва : МГУ, 1977. – С. 115–135.

5. Жигарев, Л. А. Особенности строения, распространения и формирования субаквальной криогенной толщи / Л. А. Жигарев, И. Р. Плахт // Проблемы криолитологии. – Вып. 4. – Москва : МГУ, 1979. – С. 115–124. – Текст : непосредственный.
6. Ионин, А. С. Рельеф шельфа Северо-востока СССР и вопросы его классификации / А. С. Ионин, Ю. А. Павлидис, М. Г. Юркевич. – Текст : непосредственный // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. – Москва : Наука, 1985. – С. 172–184.
7. Каплин, П. А. Новейшая история Мирового океана / П. А. Каплин. – Москва : МГУ, 1973. – 265 с. – Текст : непосредственный.
8. Конторович, А. Э. Нефть и газ российской Арктики : история освоения в XX веке, ресурсы, стратегия на XXI век / А. Э. Конторович. – Текст : непосредственный // Наука из первых рук. – 2015. – № 1 (61). – С. 46–65.
9. Неизвестнов, Я. В. Методологические основы изучения инженерной геологии арктических шельфов СССР / Я. В. Неизвестнов. – Текст : непосредственный // Инженерная геология. – 1982. – № 1. – С. 3–14.
10. Дзилна, И. Л. Методические рекомендации по инженерно-геологическому изучению нефтегазоперспективных районов шельфа / И. Л. Дзилна, В. Г. Ульст. – Рига : ВНИИ-моргео, 1983. – 80 с. – Текст : непосредственный.
11. Abdelnour, R. Small Scale Tests of Sea Bottom Ice Scouring / R. Abdelnour, B. Graham // Proceedings of the 7th International Symposium on Ice. Vol. 3. – Hamburg : Association of Hydraulic Engineering and Research, 1984. – P. 267–279.
12. Chari, T. R. A Model Study of Iceberg Scouring in the North Atlantic // T. R. Chari. – DOI 10.2118/7385-PA. – Текст : непосредственный // Journal of Petroleum Technology. – 1980. – Vol. 32, Issue 12. – P. 2247–2252.
13. Chari, T. R. Geotechnical aspects of iceberg scours on ocean floors / T. R. Chari. – DOI 10.1139/t79-036. – Текст : непосредственный // Canadian Geotechnical Journal. – 1979. – Vol. 16, Issue 2. – P. 379–390.
14. Chari, T. R. Iceberg Scour Studies in Medium Dense Sand / T. R. Chari, H. P. Green. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 2. – Quebec City : Université Laval, 1981. – P. 1012–1019.
15. Green, H. P. Iceberg Scouring and Pipeline Burial Depth / H. P. Green, A. S. Reddy, T. R. Chari. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 1. – Helsinki : Technical Research Center of Finland, 1983. – P. 280–288.
16. Test of Sea Bottom Scouring / R. Abdelnour, D. Lapp, S. Haider [et al.]. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 2. – Quebec City : Université Laval, 1981. – P. 688–705.
17. McManus, D. A. Continental Shelf Sedimentation in an Arctic Environment / D. A. McManus, J. C. Kelley, J. S. Creager. – DOI 10.1130/0016-7606(1969)80[1961:CSSIAA]2.0.CO;2. – Текст : непосредственный // GSA Bulletin. – 1969. – Vol. 80, Issue 10. – P. 1961–1984.
18. Онищенко, Д. А. Исследование особенностей процесса выпавивания песчаного грунта киллями ледяных образований с помощью трехмерного моделирования методом конечных элементов / Д. А. Онищенко, А. В. Слюсаренко, П. С. Шушпанников. – Текст : непосредственный // Вести газовой науки. – 2018. – № 4 (36). – С. 180–191.
19. Application of the mechanical model for ice scour to a field site and simulation method of scour depths / S. Kioka, A. Kubouchi, R. Ishikawa, H. Saeki. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference. – Toulon : the International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004. – P. 891–898.
20. Проблемы обеспечения геоэкологической безопасности инженерных сооружений в прибрежно-шельфовой зоне замерзающих морей / С. А. Огородов, О. В. Кокин, А. П. Вергун, В. В. Архипов. – Текст : непосредственный // Моря России : наука, безопасность, ресурсы : тезисы докладов научной конференции. – Севастополь, 2017. – С. 136–137.

References

1. Liferov, P., Høyland, K. V. (2004). In-situ ice ridge scour tests: experimental set up and basic results. Cold Regions Science and Technology. 40(1-2), pp. 97-100. (In English). DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.06.003
2. Ogorodov, S. A. (2014). Rel'efoobrazuyushchaya deyatel'nost' morskikh l'dov. Diss. ... dokt. geograf. nauk. Moscow, 261 p. (In Russian).

3. Vil'ner, B. A. (1955). Osobennosti dinamiki beregov severnykh morey. V 4 tomakh. Tom 4. Dinamika i morfologiya beregov, Moscow, AN SSSR Publ., pp. 384-396. (In Russian).
4. Danilov, I. D., & Zhigarev, L. A. (1977). Nekotorye aspekty morskoy kriologii litoral'no-shel'fovoy zony. Geograficheskie problemy izucheniya Severa: sbornik statey. Moscow, Moscow State University Publ., pp. 115-135. (In Russian).
5. Zhigarev, L. A., & Plakht, I. R. (1979). Osobennosti stroeniya, rasprostraneniya i formirovaniya subakval'noy kriogennoy tolshchi. Problemy kriolitologii, (4), Moscow, Moscow State University Publ., pp. 115-124. (In Russian).
6. Ionin, A. S., Pavlidis, Yu. A., & Yurkevich, M. G. (1985). Rel'ef shel'fa Severo-vostoka SSSR i voprosy ego klassifikatsii. Geologiya i geomorfologiya shel'fov i materikovyykh sklonov. Moscow, Nauka Publ., pp. 172-184. (In Russian).
7. Kaplin, P. A. (1973). Noveyshaya istoriya Mirovogo okeana Moscow, Moscow State University Publ., 265 p. (In Russian).
8. Kontorovich, A. E. (2015). Neft' i gaz rossiyskoy Arktiki : istoriya osvoeniya v XX veke, resursy, strategiya na XXI vek. Nauka iz pervykh ruk, 1(61), pp. 46-65. (In Russian).
9. Neizvestnov, Ya. V. (1982). Metodologicheskie osnovy izucheniya inzhenernoy geologii arkticheskikh shel'fov SSSR. Inzhenernaya geologiya, (1), pp. 3-14. (In Russian).
10. Dzilna, I. L. & Ul'st, V. G. (1983). Metodicheskie rekomendatsii po inzhenerno-geologicheskomu izucheniyu neftegazoperspektivnykh rayonov shel'fa. Riga, VNIImorgeo Publ., 80 p. (In Russian).
11. Abdelnour, R., & Graham, B. (1984). Small Scale Tests of Sea Bottom Ice Scouring. Proceedings of the 7th International Symposium on Ice. Vol. 3. Hamburg, Association of Hydraulic Engineering and Research, pp. 267-279. (In English).
12. Chari, T. R. (1980). A Model Study of Iceberg Scouring in the North Atlantic. Journal of Petroleum Technology, 32(12), pp. 2247-2252. (In English). DOI: 10.2118/7385-PA
13. Chari, T. R. (1979). Geotechnical aspects of iceberg scours on ocean floors. Canadian Geotechnical Journal, 16(2), pp. 379-390. (In English). DOI: 10.1139/t79-036
14. Chari, T. R., & Green, H. P. (1981). Iceberg Scour Studies in Medium Dense Sand. Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 2. Quebec City, Université Laval, pp. 1012-1019. (In English).
15. Green, H. P., Reddy, A. S., Chari, T. R. (1983). Iceberg Scouring and Pipeline Burial Depth. Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 1. Helsinki, Technical Research Center of Finland, pp. 280-288. (In English).
16. Abdelnour, R., Lapp, D., Haider, S., Shinde, S. B., & Wright, B. (1981). Test of Sea Bottom Scouring. Proceedings of the 6th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Vol. 2. Quebec City, Université Laval, pp. 688-705. (In English).
17. McManus, D. A., Kelley, J. C., & Creager, J. S. (1969). Continental Shelf Sedimentation in an Arctic Environment. GSA Bulletin, 80(10), pp. 1961-1984. (In English). DOI: 10.1130/0016-7606(1969)80[1961:CSSIAA]2.0.CO;2
18. Onishchenko, D. A., Slyusarenko, A. V., & Shushpannikov, P. S. (2018). Studying specifics of sandy bottom exaration by keels of glaciers using 3D simulation on the basis of the finite-element analysis. Vesti gazovoy nauki, 4 (36), pp. 180-191. (In Russian).
19. Kioka, S., Kubouchi, A., Ishikawa, R., & Saeki, H. (2004). Application of the mechanical model for ice scour to a field site and simulation method of scour depths. Proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference. Toulon, the International Society of Offshore and Polar Engineers, pp. 891-898. (In English).
20. Ogorodov, S. A., Kokin, O. V., Vergun, A. P., & Arkhipov, V. V. (2017). Problemy obespecheniya geokologicheskoy bezopasnosti inzhenernykh sooruzheniy v pribrezhno-shel'fovoy zone zamerzayushchikh morey. Morya Rossii: nauka, bezopasnost', resursy: tezisyy dokladov nauchnoy konferentsi. Sevastopol, pp. 136-137. (In Russian).

Сведения об авторах

Силина Ирина Георгиевна, аспирант кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: i_g_silina@mail.ru

Information about the authors

Irina G. Silina, Postgraduate at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: i_g_silina@mail.ru

Иванов Вадим Андреевич, д. т. н., профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Пономарева Татьяна Георгиевна, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Якубовская Светлана Васильевна, д. т. н., профессор кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Vadim A. Ivanov, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Tatyana G. Ponomareva, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Svetlana V. Yakubovskaya, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen