

*Гоманков В.А., студент
6 курс, Департамент морских арктических технологий
Дальневосточный федеральный университет;
Владивосток, Россия*

*Шмыков А.А., старший преподаватель
Департамент морских арктических технологий
Дальневосточный федеральный университет;
Владивосток, Россия*

РАЗВЕДОЧНОЕ БУРЕНИЕ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ: СИСТЕМАТИЗАЦИЯ АПРОБИРОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

***Аннотация:** Статья посвящена систематизации мирового опыта разведочного бурения на арктическом шельфе. Проведен анализ апробированных технических решений — искусственных островов (грунтовых и ледовых), погружных, полупогружных и самоподъемных буровых установок. Рассмотрены ключевые проекты, реализованные в Канадском море Бофорта и на российском шельфе, выявлены их преимущества, ограничения и извлеченные уроки. Сделан вывод о необходимости применения проверенных технологий с учетом арктической специфики для обеспечения безопасного и эффективного разведочного бурения в высоких широтах.*

***Ключевые слова:** арктический шельф, разведочное бурение, искусственные острова, погружные буровые установки, полупогружные буровые установки, самоподъемные буровые установки, ледовые нагрузки, термостабилизация грунтов.*

*Gomankov V.A., student
6th year, Department of Marine Arctic Technologies
Far Eastern Federal University;
Vladivostok, Russia*

*Shmykov A.A., senior lecturer
Department of Marine Arctic Technologies
Far Eastern Federal University;
Vladivostok, Russia*

EXPLORATION DRILLING ON THE ARCTIC SHELF: SYSTEMATIZATION OF PROVEN TECHNICAL SOLUTIONS

***Abstract:** The paper presents a systematic review of global experience in exploration drilling on the Arctic shelf. An analysis of proven technical solutions is conducted, including artificial islands (both soil and ice), submersible, semi-submersible, and jack-up drilling rigs. Key projects implemented in the Canadian Beaufort Sea and on the Russian shelf are examined, with their advantages, limitations, and lessons learned identified. It is concluded that the application of validated technologies with due regard for Arctic specifics is essential to ensure safe and efficient exploration drilling in high latitudes.*

***Keywords:** Arctic shelf, exploration drilling, artificial islands, submersible drilling rigs, semi-submersible drilling rigs, jack-up drilling rigs, ice loads, soil thermal stabilization.*

ВВЕДЕНИЕ

Освоение углеводородных ресурсов арктического шельфа является стратегическим направлением для обеспечения энергетической безопасности России. По оценкам экспертов, на арктический шельф приходится значительная доля прогнозных ресурсов углеводородов страны [1, 2]. Однако

проведение геологоразведочных работ, в первую очередь разведочного бурения, в условиях Арктики сопряжено с экстремальными природно-климатическими факторами: отрицательными температурами воздуха и воды, наличием ледового покрова (дрейфующие льды, айсберги, торосы), штормовым волнением, коротким навигационным периодом, значительной удаленностью от береговой инфраструктуры и высокой экологической уязвимостью региона [3, 4].

Актуальность систематизации опыта разведочного бурения обусловлена несколькими факторами. Во-первых, наблюдается дефицит комплексных инженерно-технических руководств, обобщающих применение апробированных решений в различных арктических сценариях [5]. Во-вторых, санкционные ограничения стимулируют развитие отечественных технологий, что требует критического осмысления накопленного опыта [6]. В-третьих, существующие нормативные документы (ISO 19906:2019, СП 38.13330.2018) требуют использования только проверенных технологий ввиду высоких рисков и катастрофических потенциальных последствий аварий [4, 7].

Цель настоящей работы — комплексный анализ апробированных технических решений для разведочного бурения на арктическом шельфе и разработка на этой основе научно обоснованных рекомендаций по их применению.

1 АПРОБИРОВАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

В данном разделе рассматриваются четыре основных типа сооружений, прошедших проверку в реальных арктических проектах. Анализ базируется на данных реализованных проектов в Канадском море Бофорта, а также на российском опыте в Печорском и Карском морях [8, 9]

1.1 Искусственные грунтовые и ледовые острова

Искусственные острова представляют собой фундаментальные сооружения, возводимые на мелководном арктическом шельфе (как правило, до 20–30 м). Их применение экономически целесообразно при глубинах моря, не превышающих 20 метров [10]. Ключевым инженерным вызовом является обеспечение устойчивости к статическим и динамическим ледовым нагрузкам, воздействию волн и течений, а также предотвращение термоэрозии грунтов основания. Конструктивные решения варьируются в зависимости от доступных материалов, гидрометеорологических условий и геотехнических характеристик донных отложений [8, 11].

Наиболее масштабный опыт строительства искусственных островов накоплен в Канадском море Бофорта в 1980-х годах. В рамках программы разведочного бурения были реализованы проекты Tarsiut N-44 (композитный остров с бетонными кессонами на песчаной берме), Uviluk P-66 (грунтовый остров, построенный методом гидронамыва), Kogyuk N-67 и Amerk P-09 (рис. 1) [8, 9]. Объемы использованного песка достигали 1,5 млн м³, а глубина воды в местах установки — 27–32 м. Общей чертой всех проектов было использование карьера Ukalerk как основного источника песка с характерным размером частиц $D_{50} = 250\text{--}360$ мкм и содержанием ила 1–4% [11].

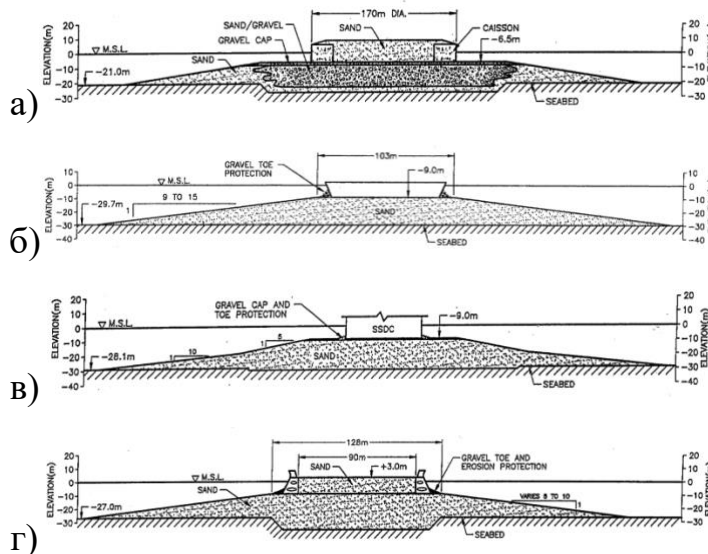


Рисунок 1. Конструктивные схемы искусственных островов Канадского моря Бофорта (а – Tarsiut N-44, б – Uviluk P-66, в – Kogyuk N-67, г – Amerk P-09) [11]

Эволюционным шагом стало применение мобильных кессонных оснований, устанавливаемых на подготовленную берму. Проекты Tarsiut P-45, Amauligak I-65 и Amauligak F-24 продемонстрировали эффективность использования стального октагонального кессона Molikpaq (рис. 2), который устанавливался на песчаную берму и заполнялся песком для увеличения массы [12, 9]. Данная конструкция позволила вести бурение при толщине торосов до 20 м [8]. Общим инженерным решением для всех проектов с кессонами стало создание подводной бермы с отметкой верха от -19,5 м (Tarsiut P-45) до -6,5 м (Tarsiut N-44) относительно уровня моря и защита основания гравийной отсыпкой для предотвращения размыва [9].

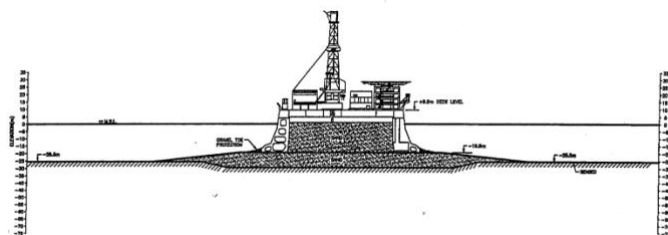


Рисунок 2. Установка стального октагонального кессона Molikpaq на подготовленную песчаную берму (проект Tarsiut P-45) [11]

Параллельно развивалась технология искусственных ледовых островов (ИЛО), возводимых методом послойного намораживания или распыления морской воды. Проекты Sohlo Rubble Generator, Big Gun Expt (ледокол Kigoriak) и Mars Island показали, что за 45–60 дней можно создать ледовую массу объемом до 770 000 м³ [13, 14, 15, 16]. Эффективность метода достигала 105% при использовании пресной воды дельты Маккензи [14]. Основные проблемы ИЛО — образование рассола в намораживаемом льду, снижающее прочность, и недостаточная масса для сопротивления сдвигу при высоких ледовых нагрузках [13, 14]. Успешным решением стало комбинирование

распыления с затоплением и использование ледоколов для достройки структур (проект SSDC Kogyuk) [14].

Характерной особенностью всех проектов искусственных островов стало повторное использование материалов. После завершения бурения острова Amauligak I-65 и Minuk I-53 стали источниками песка для новых проектов, при этом гранулометрический состав материала улучшался (D_{50} увеличивался с 320 до 360 мкм, содержание ила снижалось с 1,5 до 0,5%) за счет естественной сегрегации фракций в процессе эксплуатации бермы [8, 9].

1.2 Погружные буровые установки (ПБУ)

Погружные буровые установки относятся к плавучим сооружениям с положительной плавучестью, опирающимся на морское дно через конструкцию понтонов или колонн при постановке на точку бурения [7]. Их эксплуатация в арктических условиях ограничена относительно небольшими глубинами (до 30–40 м) и преимущественно безледным или слабольшедным периодом [5]. Основные конструктивные особенности включают усиленный корпус для сопротивления дрейфующему льду малой и средней концентрации, системы баллаستирования для обеспечения стабильности на грунте и устойчивости к сжатию льдами, а также системы аварийного сброса балласта [8, 17, 18].

Ключевым проектом ПБУ является Steel Drilling Caisson (SDC) (рис. 3) — стальной кессон весом 33 000 т, устанавливаемый на предварительно построенную песчаную берму на глубине ~30 м [8, 9]. Конструкция имела двойные стенки, заполненные бетоном для повышения прочности, и высокий надводный борт (~8 м) для предотвращения перехлестывания волн [8, 17, 18]. В отличие от других кессонов, внутренний объем не заполнялся песком — устойчивость обеспечивалась собственным весом и балластной водой. На случай аварийного бурения предусматривалась возможность размещения вертолетно-транспортируемой буровой установки на противоположном конце палубы [9].



Рисунок 3. Стальной буровой кессон SDC (Steel Drilling Caisson) [9]

Concrete Island Drilling System (CIDS) (рис. 4) представляла собой систему из четырех железобетонных кессонов (длина 80 м, ширина 15 м, высота 11 м, вес 5300 т каждый), устанавливаемых по периметру на подводную песчаную берму [8, 17, 18]. Внутреннее пространство заполнялось песчаным ядром, формируя ледостойкий массив. Надводный борт достигал 10 м. Выявленные проблемы включали перехлестывание волн и вымывание песка через стыки кессонов. Успешным решением стала установка 1200 габионов (2-тонных каменных корзин) и каменного банкета у основания кессонов [8, 9].

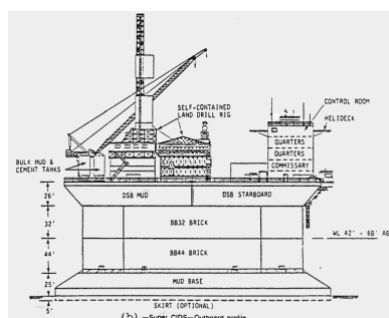


Рисунок 4. Бетонная островная буровая система CIDS (Concrete Island Drilling System) [9]

Sohio Arctic Mobile Structure (SAMS) представляла собой конструкцию с интегрированной системой коротких свай, проходящих через основание платформы [19, 17]. Сваи обеспечивали дополнительное сопротивление скольжению при экстремальных ледовых нагрузках до 450 МН, характерных для переходной зоны между припаем и дрейфующими льдами [17]. Mobile Arctic Island (MAI) основывалась на конверсии танкера VLCC — исходное судно разрезалось на секции, которые пересобирались в новую конфигурацию с добавлением ледового пояса по периметру [20]. Преимуществом являлась низкая стоимость за счет утилизации судов [20].

Российские разработки представлены платформой «Гломар Бофорт Си 1»/«Орлан» — цельнометаллической конструкцией кессонного типа, успешно применявшейся в море Бофорта [7]. Отсутствие расколов в районе ватерлинии минимизировало контакт со льдом [7]. Общим инженерным решением для всех ПБУ стало использование баллаستировки морской водой для обеспечения устойчивости и сцепления с грунтом, а также наличие систем аварийного сброса балласта для экстренного всплытия [5, 21].

1.3 Полупогружные буровые установки (ППБУ)

Полупогружные буровые установки представляют собой плавучие платформы с точкой опоры ниже уровня волнового воздействия, стабилизируемые системой якорного позиционирования или динамического позиционирования (ДП) [22, 23, 24]. Для арктических условий разрабатываются специальные модификации с усиленным корпусом, ледовыми поясами, защищенными подводными конструкциями и системами управления льдом [7]. Они предназначены для разведочного бурения на больших глубинах (свыше 100 м) в условиях открытой воды, разреженного льда или дрейфующих льдин [25, 5, 26].

Наиболее известным проектом является Kulluk (рис. 5) — уникальная конструкция в форме обратного конуса с углом наклона бортов 30° к горизонтали [25, 5, 26, 7, 8, 17, 27]. Диаметр по ватерлинии составлял 81 м, высота корпуса — 34 м (свободный борт — 12 м с учетом дефлекторов). Усиленный корпус категории Arctic Class 4 был рассчитан на давление многолетних льдов [27]. Система позиционирования включала 12 якорных линий диаметром 90 мм, удерживающих платформу при толщине льда до 1,2 м [17]. Ледозащитными элементами служили обратный выступ в нижней части конуса для защиты якорных тросов и кольцо-дефлектор для перенаправления льдин [27]. Эксплуатационным ограничением являлась необходимость ледокольной поддержки при превышении расчетной толщины льда [17].

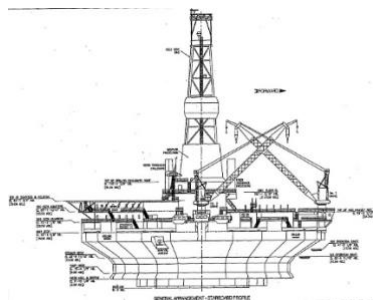


Рисунок 5. Полупогружная буровая установка Kulluk (конусная конструкция) [27]

Полярная звезда (рис. 6) представляет собой катамаранную полупогружную платформу с двумя параллельными понтонами и шестью вертикальными стабилизирующими колоннами (по 3 на каждый понтон) [22, 23, 24, 28]. Конструкция включает 4 яруса поперечных диагональных раскосов между колоннами ($\varnothing$ 1,2 м) для повышения жесткости на 40% [28]. Размеры понтонов: длина 110 м, ширина 20 м; верхнее строение — 75×75 м [22]. Ледовая защита обеспечена коническими оголовками колонн (угол 60°) из стали Hardox 450 (толщина 45 мм) и системой электрического подогрева критических узлов [28]. Гибридная система позиционирования включает 12 якорей (масса 18 т каждый) с цепями $\varnothing$ 100 мм и резервные подруливающие устройства ($4 \times 3,5$ МВт) [22].



Рисунок 6. Катамаранная полупогружная буровая установка «Полярная звезда» [22]

CS-50 — катамаранная ППБУ с двумя параллельными понтонами (длина 117,6 м, ширина 69,7 м) и шестью вертикальными колоннами [29]. Силовой каркас формируют трубчатые связи ($\varnothing$ 3 м) в продольном

направлении и трубы ($\varnothing$ 2 м) в поперечном [29]. Конструкция использует сталь с пределом текучести 355 МПа и упрощенные сварные соединения с минимальной толщиной элементов <30 мм для соблюдения требований к хладостойкости [29]. Sedco 710 (рис. 7) стала первой ППБУ с динамическим позиционированием (DP-3) вместо якорей [7]. 8 подруливателей по 5,5 МВт с компьютерным управлением обеспечивают точность удержания ± 1 м при течениях до 3 узлов [7]. Удлиненные понтоны (длина 120 м) и колонны переменного сечения (диаметр от 14 м у основания до 10 м у палубы) адаптированы для глубоководных работ [7].



Рисунок 7. Полупогружная буровая установка Sedco 710 (система DP-3)
[7]

Общим вызовом для всех ППБУ является сложность позиционирования в ледовых условиях. Успешным решением стало использование гибридных систем (якоря + подруливатели), а также активное управление льдом с помощью ледоколов сопровождения [7]. Характерной конструктивной особенностью является отсутствие раскосов в зоне ватерлинии для предотвращения образования ледовых «воротников» [23, 30, 31].

1.4 Самоподъемные буровые установки (СПБУ)

Самоподъемные буровые установки являются мобильными платформами, сочетающими свойства плавучего судна (при транспортировке) и стационарной платформы (при бурении) [22, 5, 7]. После позиционирования опорные колонны опускаются на грунт, а корпус поднимается над уровнем моря вне зоны прямого воздействия льда и волн [5]. Применение СПБУ в

Арктике требует значительных конструктивных усиления опорных конструкций и механизмов подъема для противодействия ледовым нагрузкам, а также адаптации к сложным грунтовым условиям мелководья [22, 7].

В настоящее время в мире не существует СПБУ для круглогодичной работы в тяжелых арктических льдах [5]. Однако ведутся разработки, и накоплен опыт сезонной эксплуатации. Мурманская и Кольская установки (рис. 8) представляют собой классические СПБУ с понтонным основанием, опорными колоннами («ногами») и подвижным верхним строением с буровым оборудованием [22, 5, 7]. Глубина бурения скважин достигает 6500 м, диапазон рабочих глубин — 12–100 м [7]. Ключевое ограничение — работа только в безледный период или при минимальной ледовой нагрузке [5].



Рисунок 8. Самоподъемная буровая установка «Мурманская» [7]

Арктическая (проект 15402М ЦКБ «Коралл») (рис. 9) является самоходной СПБУ ледового класса Arc4, предназначенной для работы в битом льду толщиной до 0,6 м [22, 5, 7]. Глубина бурения — до 6500 м, диапазон рабочих глубин — 7–100 м [7]. Ключевым преимуществом является самоходность (скорость 7 узлов), позволяющая оперативно менять позиции без буксиров [5]. Конструктивные отличия от «Мурманской» включают усиленный ледовый класс и наличие собственной двигательной установки [7].



Рисунок 9. Самоходная СПБУ «Арктическая» (проект 15402М ЦКБ «Коралл») [7]

Общим ограничением для всех СПБУ является уязвимость опорных колонн при ледовом сжатии и торосообразовании [49]. Концептуальные решения направлены на усиление «ног» цилиндрическими накладками на уровне ватерлинии (ЛСПБУ ЦКБ МТ «Рубин») [49] и применение систем активного мониторинга ледовых нагрузок в режиме реального времени.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В данном разделе представлена сводная таблица, обобщающая основные параметры всех 41 апробированных сооружений, а также сформулированы научно обоснованные рекомендации. Их обобщенные параметры сведены в таблицу 1 и 2.

Таблица 1.

Сводные параметры апробированных конструкций для разведочного бурения в Арктике

Название	Тип	Макс. глуб., м	Ледовые условия	Масса (приблизительная)	Проектный период, лет	Период эксплуатации (фактический)	Источники
Tarsiut N-44	Композитный остров	21	Круглогодично	Нет данных	5–10	Заброшен в 1984 г.	[8, 11, 9]
Uviluk P-66	Грунтовой остров	29,7	Круглогодично	1,9 млн м ³ намывного материала	5–10	После бурения оставлен	[8, 11, 9]
Kogyuk N-67	Грунтовой остров	28,1	Круглогодично	~1,45 млн м ³ песка	5–10	1982–1983 гг.	[8, 9]

Название	Тип	Макс. глуб., м	Ледовые условия	Масса (приблизительная)	Проектный период, лет	Период эксплуатации (фактический)	Источники
Kadluk O-07	Композитный остров	14	Круглогодично	450 000 м ³ песка	5–10	Зима 1983–84 гг., заброшен	[8, 9]
Amerk P-09	Композитный остров	27	Круглогодично	1,5 млн м ³ песка	5–10	Зима 1984–85 гг., заброшен	[8, 9]
Nipterk L-19	Грунтовый остров	11,7	Круглогодично	1,5 млн м ³ материала	5–10	1983–1984 гг.	[11, 9]
Tarsiut P-45	Композитный остров	25,5	Круглогодично	400 000 м ³ песка	5–10	Зима 1984–85 гг., заброшен	[8, 9]
Minuk I-53	Грунтовый остров	14,7	Круглогодично	~2 млн м ³	5–10	1985–86 гг., разрушен	[8, 9]
Amauligak I-65	Композитный остров	31	Сложная ледовая обстановка	1,41 млн м ³ песка	5–10	1985–86 гг., заброшен	[8, 9]
Kaubvik I-43	Композитный остров	17,9	Круглогодично	566 000 м ³	5–10	1986–87 гг., заброшен	[8, 9]
Amauligak F-24	Композитный остров	32	Круглогодично	2 млн м ³	5–10	1988 г., демонтирован	[11, 9]
Alerk Island	Ледовый остров	11,6	Период зимы, экспериментальный	Нет данных	1 сезон	Зимний период	[14, 15]
Sohlo Rubble Generator	Ледовый остров	13	Эффективность 51%	51 000 тонн льда	1 сезон	1983/84 гг. (зима)	[13, 14]
Ice Island Experiment	Ледовый остров	13,5	Эффективность 47% по объёму	Нет данных	1 сезон	Зимний период	[13, 14]
Big Gun Experiment	Ледовый остров	14	Тестирование мощного распылителя	Нет данных	1 сезон	1983/84 гг. (зима)	[13, 14]
SSDC Kogyuk	Ледовый остров	28,4	Буровой ледовый остров	125 000 м ³ льда	1 сезон	1983/84 гг. (зима)	[13, 14]

Название	Тип	Макс. глуб., м	Ледовые условия	Масса (приблизительная)	Проектный период, лет	Период эксплуатации (фактический)	Источники
CIDS Antares Barrier	Ледовый остров	14,9	Подковообразная структура	1,6 млн тонн льда	1 сезон	60 дней (зима)	[13, 14]
Cape Allison C-47	Ледовый остров	7,9	Скорость наращивания 70 мм/день	Нет данных	1 сезон	Зимний период	[13, 14]
Mars Island	Ледовый остров	7,6	Пиковая производительность 40 ч/день	770 000 м³ льда	1 сезон	45 дней (зима)	[14]
Angasak L-03	Ледовый остров	5,6	Скорость наращивания 210 мм/день	Нет данных	1 сезон	58 дней, 1986/87 гг.	[14]
Nipterk P-32	Ледовый остров	6,9	Эффективность 105% (рекорд)	Нет данных	1 сезон	Зимний период	[14]
Karluk	Ледовый остров	7,6	900 мм/день при -29°C	Нет данных	1 сезон	Зимний период	[13, 14]
Natchiq	Ледовый остров	2,3	21 день строительства	Нет данных	1 сезон	2003 г. (зима)	[14]
Steel Drilling Caisson (SDC)	ПБУ	30	Торосы, многолетний лед	~80 000 т	25–30	1982–2006 гг.	[8, 32, 18, 9]
Concrete Island Drilling System (CIDS)	ПБУ	22	Торосистый пояс	4 × 5 300 т	25	1980-е гг.	[8, 18, 9]
Glomar Beaufort Sea 1 / Орлан	ПБУ	16,8	Торосы, стамухи	~59 000 т	25–30	1984–2004 (Аляска), с 2004 (Россия)	[26]
Sohio Arctic (SAMS)	ПБУ	18	Нагрузка >450 МН	Нет данных	20–25 (проект)	Проект 1984 г.	[19, 17]
Mobile Arctic Island (MAI)	ПБУ	23	Нагрузка до 9 МН	Нет данных	15–20 (конверсия)	Концепт 1984 г.	[20]
Condee p (Troll A)	ПБУ	303	Давление льда толщиной до 1 м	~850 000 т	50+	С 1995 г.	[5, 21]

Название	Тип	Макс. глуб., м	Ледовые условия	Масса (приблизительная)	Проектный период, лет	Период эксплуатации (фактический)	Источники
Северное сияние	ППБУ	500	Битый лед до 0,7 м	~59 260 т	25–30	С 2023 г.	[22, 28]
CS-50	ППБУ	600	Битый лёд	31 250 т	25	Нет данных	[29]
Kulluk	ППБУ	50	Расчётная толщина 1,2 м	17 500 / 28 000 т	20–25	1983–2012 гг.	[25, 5, 26, 17]
Alaskan Star	ППБУ	450	Низкая нагрузка	Нет данных	25	Нет данных	[7]
Western Pacesetter IV	ППБУ	450	Битый лед до 0,7 м	Нет данных	25	Нет данных	[7]
Sedco 600	ППБУ	600	—	Нет данных	25	Нет данных	[7]
Sedco 710	ППБУ	710	—	Нет данных	25–30	Нет данных	[7]
Stena Don	ППБУ	500	Битый лед до 0,7 м	3 700 т	25	С 2001 г.	[7]
Transocean Enabler	ППБУ	1640	Умеренная нагрузка	~60 000 т	25–30	В эксплуатации	[7]
Ice-cutting semi-submersible (ICS DV)	ППБУ (концепт)	>100	Теоретический и режет торосы 12 м	Нет данных	—	Не реализован	[17]
Мурманская / Кольская	СПБУ	100	Только безлёдный период	69,2×80 м	25–30	«Кольская» с 1985 г.	[22, 5, 7]
Амазон	СПБУ	50	Безлёдный период (класс Arc4)	Нет данных	25	Нет данных	[22, 5, 7]

Таблица 2.

Сводная таблица всех конструкций для разведочного бурения в Арктике

Тип установки	Глубина моря, м	Ледовая нагрузка	Преимущества	Недостатки
Искусственные грунтовые острова	До 20–30	До 800 МН (кессонные) [8]	Надежность, проверенная технология,	Высокая стоимость, экологические

Тип установки	Глубина моря, м	Ледовая нагрузка	Преимущества	Недостатки
			возможность рециклинга [9]	риски, ограничение по глубине [10]
Искусственные ледовые острова	До 15	Ограниченная (сезонные) [14]	Скорость строительства (45–60 дней), низкая стоимость [13]	Сезонность, низкая прочность, проблемы с рассолом [14]
Погружные установки (ПБУ)	До 30–40	До 450–800 МН [19, 17]	Мобильность, устойчивость на грунте, многоразовость [8]	Ограничение по глубине и ледовой обстановке [5]
Полупогружные установки (ППБУ)	Свыше 100	До 16 МН (на колонну) [23]	Работа на больших глубинах, ДП-системы, высокая остойчивость [7]	Сложность позиционирования во льдах, необходимость ледокольной поддержки [17]
Самоподъемные установки (СПБУ)	До 100	До 0,6 м льда [5]	Мобильность, быстрая постановка, широкий диапазон глубин [7]	Неприменимы в тяжелые льды, уязвимость опорных колонн

3 ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенный анализ апробированных технических решений для разведочного бурения в Арктике позволяет сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Выбор типа установки определяется комплексом факторов: глубиной моря, ледовой обстановкой, геотехническими условиями дна и экономической целесообразностью [22, 5, 7]. На мелководье (до 20 м) предпочтительны искусственные острова и кессонные ПБУ [8]. На глубинах 20–100 м — СПБУ (в безледный период) и ПБУ с усиленным корпусом [5]. На глубинах свыше 100 м — ППБУ с системами ДП или якорного позиционирования [7].

2. Искусственные ледовые острова являются эффективным сезонным решением для мелководных акваторий с продолжительным ледовым периодом [13, 14]. Основные направления совершенствования — удаление рассола при намораживании и увеличение массы острова для сопротивления

сдвигу [14]. Эффективность метода достигает 105% при использовании пресной воды [14].

3. Гибридные конструкции, сочетающие грунтовую берму и мобильный кессон (Molikpaq, CIDS), доказали свою эффективность при ледовых нагрузках до 800 МН и могут быть адаптированы для российских условий с учетом глубины до 60 м [8, 9]. Концепция КОМБУ ЦКБ «Коралл» является прямым развитием этого подхода.

4. Для глубоководных районов (Карское море, 50–300 м) наиболее перспективны ледостойкие ППБУ с клиновидной формой корпуса и турельными системами удержания, позволяющими автоматически ориентироваться относительно направления дрейфа льда [23, 31].

5. Логистические вызовы в российской Арктике требуют применения буровых растворов на углеводородной основе (РУО) для обеспечения устойчивости ствола скважины в интервалах реактивных глин, а также систем контроля эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) в режиме реального времени [4, 7].

6. Рециклинг материалов (песок с островов Amauligak I-65, Amerk P-09) показал экономическую эффективность и улучшение гранулометрического состава за счет естественной сегрегации [8, 9]. Эта практика должна быть масштабирована для российских проектов.

7. Критические инциденты (разрушение Minuk I-53 штормом, осадка основания Amauligak I-65) подтверждают необходимость консервативного подхода к проектированию и учета экстремальных климатических сценариев [8, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация апробированных технических решений для разведочного бурения в Арктике показывает, что накопленный за 40 лет опыт в Канадском море Бофорта и на российском шельфе позволяет выбрать оптимальную конструкцию для конкретных условий [8, 9]. Искусственные

острова остаются наиболее надежным решением для мелководья, ПБУ и СПБУ обеспечивают мобильность на средних глубинах, а ППБУ являются единственным вариантом для глубоководных районов. Однако экстремальные ледовые нагрузки, сложные геотехнические условия и удаленность районов требуют дальнейшего совершенствования технологий — в частности, развития гибридных конструкций, активных систем термостабилизации грунтов и адаптивных систем позиционирования. Конвергенция апробированных технологий и инновационных разработок позволит обеспечить безопасное и эффективное круглогодичное разведочное бурение в высоких широтах, снижая риски и стоимость проектов [6].

Использованные источники:

1. Пашин В.М. Инновации и перспективы создания морской техники. 2011.
2. Аношина К.В. Современные технологии разработки нефтегазовых месторождений арктического шельфа. 2024.
3. Благовидова И.Л. [и др.]. Аспекты проектирования ледостойкой буровой платформы для условий Обско-Тазовской губы // Russian Journal of Water Transport. 2023. № 74. С. 15–26.
4. Пармухина Е.Л. Развитие рынка морских буровых установок в России. 2016.
5. Добряков И.С. Выбор технологии и технических средств для разведочного и эксплуатационного бурения на шельфе Карского моря. 2011.
6. Савинов Ю.А., Ганжинова С.А. Перспективы российских шельфовых проектов в Арктике. 2017.
7. Хвалимова А.А., Благовидова И.Л., Иванова Н.С. Анализ применимости различных типов буровых установок для разведочного бурения в арктических условиях. 2022.
8. Beaufort C. Oil and Gas Exploration & Development Activity Forecast. 2012.

9. Timco G.W., Frederking R. Overview of Historical Canadian Beaufort Sea Information. 2009.
10. Riley J.G. The Construction of Artificial Islands in the Beaufort Sea.
11. Gowan B. Granular Borrow and Fill Quality at Selected Locations Canadian Beaufort Sea. 1997.
12. Mancini C.V. [и др.]. Caisson Retained Island for Canadian Beaufort Sea — Geotechnical Design and Construction Considerations. 1983.
13. Андреева С.А., Шарапов Д.А. Ледовые острова, схемы и особенности. 2023.
14. Мызовская Ю.Р. Строительство искусственных ледовых островов для бурения. 2019.
15. Baudais D.J., Masterson D.M., Watts J.S. A system for offshore drilling in the Arctic islands // Proceedings of the 25th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of CIM. 1974.
16. Palmer A.C., Baudais D.J., Masterson D.M. Design and installation of an offshore flowline for the Canadian Arctic Islands // Proceedings Eleventh Annual Offshore Technology Conference. 1979. С. 765–772.
17. Frederking R.M.W. Exploration and production concepts and projects for the Arctic offshore. 1984.
18. Hnatiuk J. Exploration Methods in the Canadian Arctic. 1983.
19. Anon. Design work on Sohio mobile structure nears completion // Ocean Industry. Vol. 19 (1). 1984. С. 39–40.
20. Anon. New concept uses tanker for drilling/storage // Ocean Industry. 1984. (19 (1)). С. 31–32.
21. Palmer H.E. [и др.]. Offshore Drilling and Production Structure. 1979.
22. Хвалимова А.А. [и др.]. Выбор типа буровой установки для разведочного бурения в арктических условиях по методу анализа иерархий // Russian Journal of Water Transport. 2023. № 76. С. 61–74.

23. Крыжевич Г.Б. Проблемы проектирования и перспективы развития ледостойких полупогружных плавучих буровых установок // Arctic: Ecology and Economy. 2017. № 4(28). С. 108–117.

24. <http://www.deutsche-oel-gas.com>. Drilling of natural gas well KLU A-2 off to a successful start. // Deutsche Oel & Gas.

25. Сочнева И.О., Сочнев О.Я. Мобильная морская буровая установка в арктическом исполнении (выбор концепции). 2015.

26. Крыжевич Г.Б. Концептуальные решения для ледостойких плавучих буровых установок, обеспечивающие круглогодичную эксплуатацию в Арктике.

27. Hnatiuk J., Wright B.D. Ice management to support the Kulluk drilling vessel // 35th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of CIM. 1984. С. 10–13.

28. Ignatovich V.S., Kuz'mina A.V., Rodkina A.V. Issledovaniya osnovnykh kharakteristik polupogruzhnykh plavuchikh burovyykh ustanovok na nachal'nykh stadiyakh proyektirovaniya // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. С. 7–15.

29. Yang H., Li Z., Zhu C. Development status and trend analysis of anti-icing semisubmersible drilling platform. IOP Publishing Ltd, 2021.

30. Амосова Н.В. [и др.]. Концептуальные проектные решения для погружной комбинированной буровой установки для круглогодичного бурения в арктических условиях. 2021.

31. Плавучие полупогружные буровые установки: история, современность, перспективы: Аналитический обзор // Крыл. гос. науч. центр. 2014. С. 212.

32. Blanchet D., Abdelnour R., Comfort G. Mechanical Properties of First-Year Sea Ice at Tarsiut Island.