



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

На тему: Исследование внутреннего строения торосов и стамух
методом термобурения

Исполнитель Козлов Данил Денисович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

(подпись)

доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Завгородний Владимир Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич

(фамилия, имя, отчество)

« » 2024 г.

Санкт-Петербург

2024



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра информационных технологий и систем безопасности

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой ИТиСБ

_____ / Бурлов В.Г.

«___» _____ 2024 г.

Задание

на выпускную квалификационную работу

Студенту Козлову Данилу Денисовичу

- 1. Тема** «Исследование внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения»

закреплена приказом ректора Университета от 30.08.2023 года, №935-с

- 2. Срок сдачи законченной работы**
- 3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе:**

Научные статьи, проектная документация, учебные пособия.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке (краткое содержание работы):

- Дать общие определения торосам и стамухам;
- Рассмотреть методику изучения внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения;
- Проанализировать результаты исследования внутреннего строения тросов и стамух методом термобурения в различных регионах;
- Оформить ВКР как рукописный труд, разработка презентации и защита ВКР.

5. Перечень материалов, предоставляемые к защите:

- раздаточный материал

6. Консультанты по работе:

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Профессор каф. ИТСБ д.т.н

Завгородний В. Н.

(должность, ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество)

(подпись)

Дата выдачи задания: 30.08.2023

Задание принял к исполнению

Студент Козлов Д.Д., МД-М22-1

(фамилия, имя, отчество, учебная группа)

(подпись)

Реферат

Магистерская диссертация: 80 страниц, 38 рисунков, 11 таблиц, 33 источника литературы.

Объект исследования: метод термобурения для исследования внутреннего строения торосов и стамух.

Предмет исследования: торосы и стамухи арктического региона.

Цель работы: изучение и анализ исследования торосов и стамух методом термобурения как наиболее актуальный и эффективный метод исследования.

- Дать общие определения, понятия и характеристики торосов и стамух.
- Рассмотреть методику изучения внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения.
- Проанализировать результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения в различных регионах.

В выпускной квалификационной работе произведен анализ метода исследования внутреннего строения торосов и стамух термобурением. Произведен анализ результатов исследования торосов и стамух в различных регионах.

Оглавление

Оглавление.....	5
Введение.....	6
Глава 1. Торосы и стамухи	8
1.1 Методы определения ледовых опасностей	8
1.2 Стамухи и торосы арктических морей.....	19
1.2.1 Стамухи арктических морей.....	21
1.2.2. Торосы Арктических морей.....	22
1.3 Современное состояние исследования торосов и стамух.....	24
1.4 Вывод по главе 1	29
Глава 2. Метод термобурения.....	30
2.1 Технические средства термобурения.....	30
2.2 Методы электротермобурения и бурения горячей водой.....	34
2.2.1 Электротермобурение	34
2.2.2 Бурение горячей водой.....	37
2.3 Методика определения участков плотного и рыхлого льда,.....	41
границ пустот.....	41
2.4 Методика определения границ консолидированного слоя	51
2.5 Выводы по главе 2.....	54
Глава 3. Результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух в различных регионах.	56
3.1 Торосы Печорского моря	56
3.2 Торосы Арктического региона	59
3.3 Торосы и стамухи шельфа о. Сахалин	67
3.4 Выводы по главе 3.....	74
Заключение	75
Список используемой литературы	76

Введение

В настоящее время ведется активное изучение Арктического региона, в котором находятся огромные запасы нефти, газа и полезных ископаемых. Арктическая зона содержит примерно 25% энергетических ресурсов планеты. По оценкам специалистов, уже к 2050 году Арктика будет обеспечивать от 20 до 30% всей российской нефтедобычи[1].

В Северно-Ледовитом океане проложена важная для России и всего мира в целом судоходная артерия - Северный морской путь (СМП). Северный морской путь – кратчайший путь из Европы в Азию. СМП имеет очень важное политическое и экономическое значение для России, как и вся Арктическая зона, большая часть которой принадлежит Российской Федерации[2]. Уже в обозримом будущем Россия станет крупным морским транспортным узлом, который соединит Азию и Европу.

Так как Арктический регион большую часть года покрыт льдами, это оказывает большое влияние на судоходство и хозяйственную деятельность в данном регионе. Для обеспечения безопасности мореплавания и проведения хозяйственной деятельности необходимо изучать ледовые условия данного региона, ледовые опасности и внутреннее строение ледовых образований.

Актуальность данной темы, подтверждается тем, что исследование внутреннего строения торосов и стамух, играет большую роль в изучении процессов формирования льда, прогнозировании ледообразования и ледовых условий

Предметом исследования являются торосы и стамухи арктического региона.

Объектом исследования является метод термобурения для исследования внутреннего строения торосов и стамух.

Целью данной работы является изучение и анализ исследования торосов и стамух методом термобурения как наиболее актуальный и эффективный метод исследования.

Для достижения цели в работе решаются следующие задачи:

1. Дать общие определения, понятия и характеристики торосов и стамух.
2. Рассмотреть методику изучения внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения.
3. Проанализировать результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения в различных регионах.

Выпускная квалификационная работа включает в себя введение, три главы, заключение и список использованной литературы. Содержание первой главы посвящено теоретической части предмета исследования. Во второй главе подробно рассматривается метод термобурения. В третьей главе представлены и проанализированы результаты термобурения торосов и стамух.

В процессе написания данной работы использовались научные и учебно-методические работы отечественных авторов, публикации в научных журналах и материалы периодической печати.

Глава 1. Торосы и стамухи

1.1 Методы определения ледовых опасностей

Для определения ледовых опасностей производится ледовая разведка, которая, в свою очередь, представляет собой наблюдение, осуществляемое как при помощи специального инструментария (инструментальное наблюдение), так и при помощи зрительного изучения (визуальное наблюдение) ледовой обстановки. В свою очередь ледовая обстановка характеризует состояние льда (ледового покрова) на морях, а также на реках, озерах, водохранилищах, называемых внутренними водами. Ледовая обстановка имеет крайне важное значение для обеспечения безопасности кораблеплавания, в частности ее относят к феномену, характеризующему условия для плавания кораблей (судов)[3].

Ледовая обстановка характеризуется следующими параметрами: количеством и толщиной льда, уровнем его деформации и сплоченностью (в системе оценки используется 10-балльная шкала, где за каждые 10% поверхности воды, покрытой льдом, начисляется один балл).

Ледовая разведка выполняется для того, чтобы накапливать и анализировать информацию о природе и состоянии льда в морях, которые замерзают полностью или частично. Это необходимо для того, чтобы гарантировать безопасность мореплавания, а также для поддержки экономической и научной работы в этих регионах.

Для проведения ледовой разведки применяют специальные технические средства и водный транспорт: дрейфующие автоматические радиометеостанции, летательные аппараты, специальные корабли и морские суда, наземные и дрейфующие гидрометеостанции, а также летательные аппараты, которые в настоящее время очень активно применяются в проведении ледовой разведки.

Задачи ледовой разведки представлены на рисунке 1.

Всестороннее изучение ледового покрова
Изучение границ распространения ледового покрова, его толщины и сплоченности
Изучение на наличие трещин, полыней и разводий в ледовом покрове
Изучение положения и состояния кромки льда
Изучение прочности и грузоподъемности льда
Изучение направления и скорости дрейфа ледового покрова
Изучение возраста льда
Изучение торосистости льда
Поиск ледяных островов
Определение других характеристик ледяного покрова

Рисунок 1 – Задачи ледовой разведки

Существует несколько методов проведения ледовой разведки: космическая (спутниковая) разведка, водная и авиационная (воздушная).

Исследование ледовых покровов (ледовая разведка) осуществляется при помощи прибрежных гидрометеорологических станций и постов, наземных станций, дрейфующих на льду гидрометеостанций, с использованием автоматических радио-метеостанций, а также при поддержке судов, в том числе специализированных ледоколов.

На рисунке 2 изображен ледокол Арктика с которого может проводится ледовая разведка.



Рис. 2. Ледокол Арктика

На рисунке 3 изображен береговой гидрометеорологической пост



Рис. 3. Береговой гидрометеорологической пост

На рисунке 4 показана дрейфующая на льду гидрометеостанция.

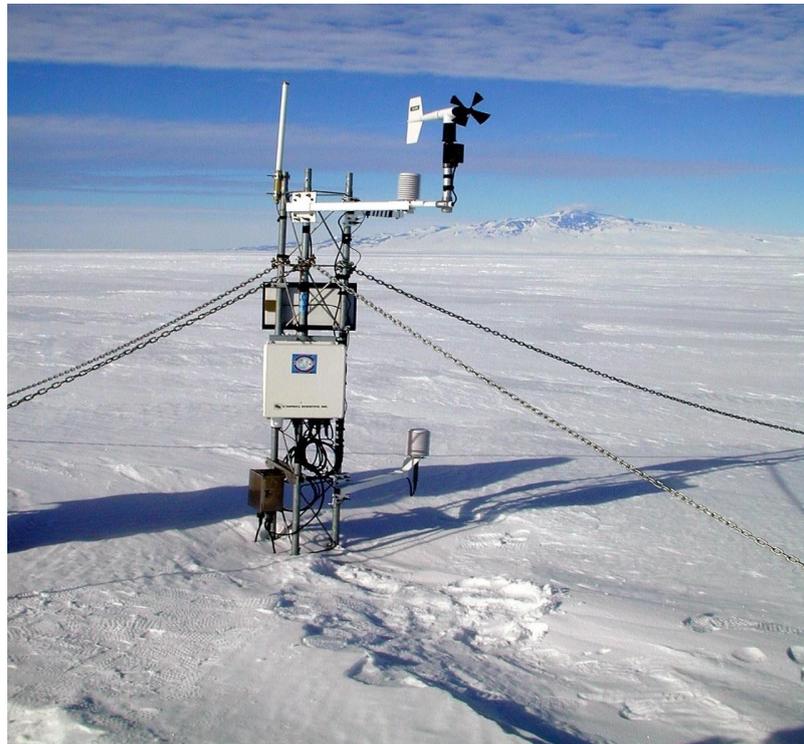


Рис.4. Дрейфующая на льду гидрометеостанция

Специализированный самолет, оборудованный для проведения воздушной ледовой разведки, имеет на борту разнообразное радиоэлектронное оборудование и цифровую пилотажно-навигационную систему. Это позволяет ему выполнять задачи мониторинга, включая исследование ледяных условий, а также осуществлять поисково-спасательные операции[4].

На рисунке 5 представлена летающая лаборатория на базе самолета ИЛ-114.



Рисунок 6 демонстрирует суммарное число стамух, зарегистрированных в рамках квадратов размером 100 на 100 километров, согласно результатам аэроразведки ледниковых территорий в период с 1962 по 1995 годы.

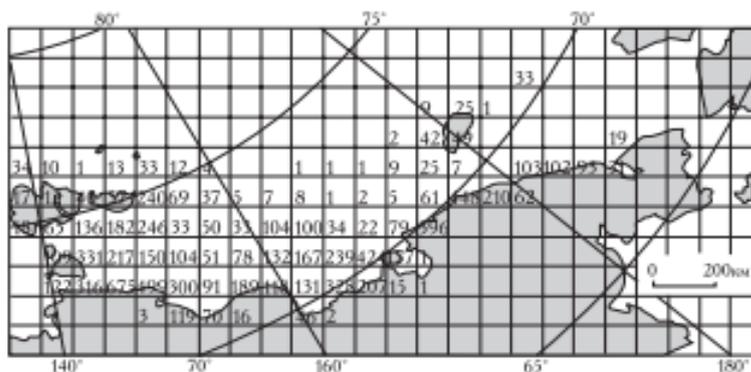


Рис. 6. общее количество стамух, зафиксированных в квадратах сетки 100×100 км по данным ледовой авиаразведки в 1962-1995 гг.

Метод дистанционного зондирования (МДЗ) ледовых опасностей – сбор информации об обстановке без непосредственного контакта регистрирующего прибора со льдом. Данным методом пользуются при анализе ледовой обстановки со спутников или самолётов[5].

С помощью обработки данных, полученных методами дистанционного зондирования, можно получить такую информацию о ледовом покрове как: сплочённость льда, положение кромки льдов, тип и возраст льдов, толщина покрова, направление дрейфа, температура поверхности льда [12].

Сплочённость льда – это характеристика, описывающая площадь морской поверхности, которая покрыта льдом, в отношении всей рассматриваемой площади.

Существует два типа морского льда: подвижный и неподвижный. К неподвижному относится припай – сплошной покров, распространяющийся от побережья или мелководья. К подвижным льдам относятся дрейфующие льды.

Лёд разделяют по стадиям развития:

- начальный (толщиной до 5 см);

- нилас (толщиной 5-10 см);
- молодой серый (10-15 см) и молодой серо-белый (15-30 см);
 - однолетний (до 1,5-2 м и возрастом не более одного зимнего периода);
- многолетний (выдержавший летнее таяние).

Дистанционное зондирование может быть активным и пассивным. Пассивное зондирование – измерение естественных излучений земной поверхности. Активное зондирование – использование прибора-излучателя[6].

Датчики пассивного зондирования в видимом- и ИК-диапазонах производят классификацию льда по яркости, а сплочённость оценивают подсчётом и сопоставлением числа пикселей. Данные измерения могут предоставлять данные о ледовом покрове в большом разрешении, анализ информации может производиться в оперативном режиме.

Видимый спектр обеспечивает наглядное отображение ледового покрова акватории (рис.7), но сильно зависит от метеоусловий и условий освещения .

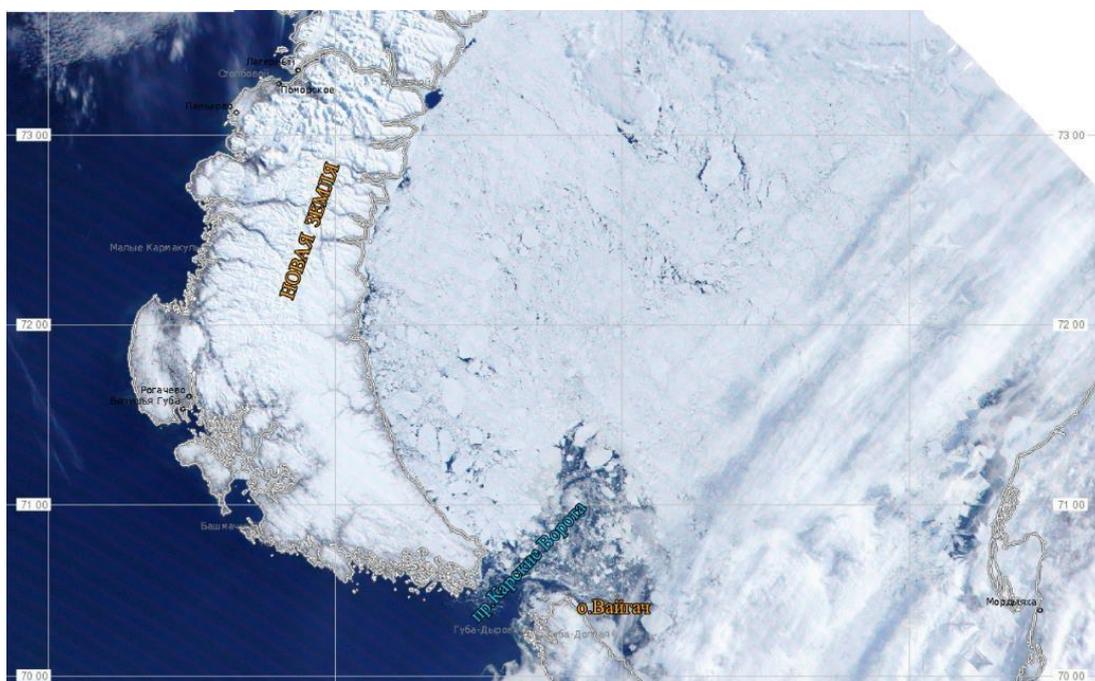


Рис.8. Пример ДЗ в видимом диапазоне

В условиях Арктики данный метод обеспечивает высокое пространственное разрешение только в условиях полярного дня, что наглядно продемонстрировано на рисунке 8.

В случаях, когда облачность или условия освещения не позволяют выполнить зондирование в видимом диапазоне, используют приборы, фиксирующие микроволновое излучение поверхности. Микроволновое излучение – электромагнитное излучение, включающее в себя сантиметровый и миллиметровый диапазон радиоволн (рис.9).

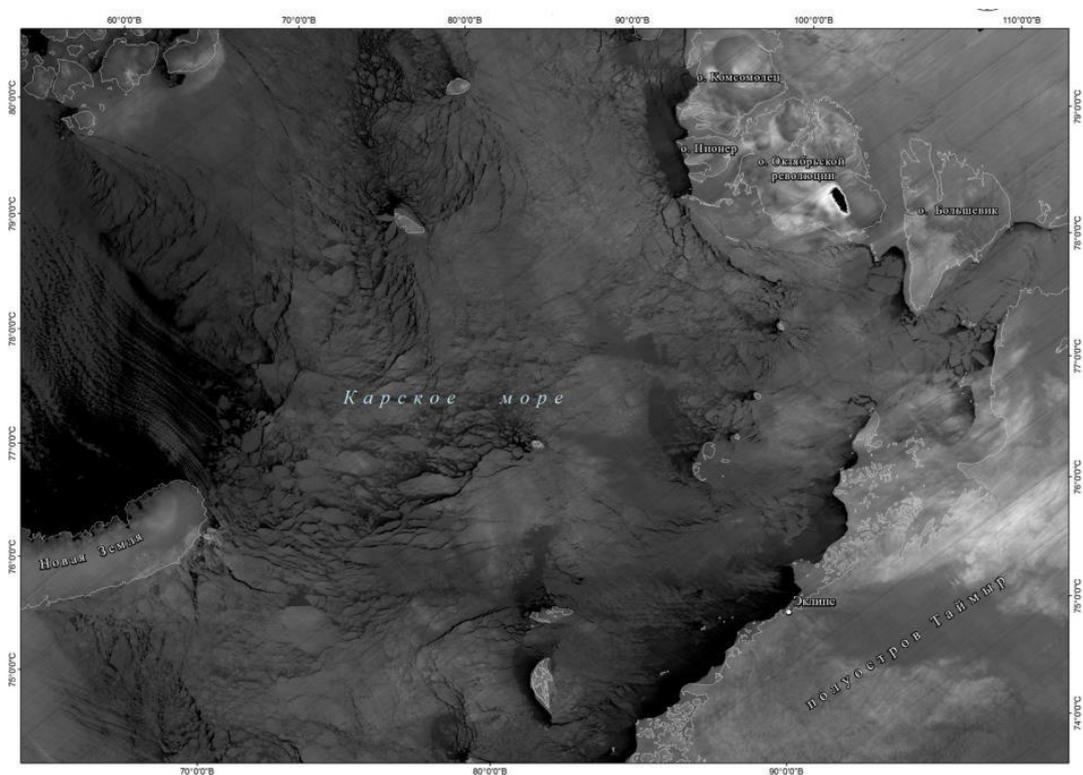


Рис.9. Ледовая обстановка по данным космического зондирования в ИК-диапазоне

На рисунке 9 подчеркиваются ключевые преимущества микроволновых радиометров, включая их способность работать в любое время суток и при любых погодных условиях, а также обеспечивать глобальное и регулярное покрытие. Однако существуют и определенные недостатки, такие как требования к высокой чувствительности приемников, необходимость в точной калибровке устройств и относительно низкое разрешение данных.

В методах дистанционного зондирования могут использоваться спектрометрические приборы – спектральные приборы для измерения фотометрических характеристик оптического излучения. Использование подобных приборов позволяет определять ледовые опасности размерами от 250 м [7].

Всего существует 7 каналов с разной длиной волны (табл.1). Каждый

канал имеет свои достоинства и недостатки, и, следовательно, сферы применения. Комбинируя каналы (табл. 2), можно добиться создания изображения в естественных цветах или, наоборот, в ложных, делая акценты на необходимые объекты.

Таблица 1

Характеристики спектральных каналов

Каналы	Длина волны, мкм	Особенности диапазона и сфера применения
Синий	0,45-0,52	Наибольший коэффициент поглощения в атмосфере. Используется в океанографии для батиметрии, мониторинга метеорологических динамических явлений (вихри, фронты).
Зелёный	0,52-0,60	Максимальный коэффициент отражения от растительности. Используется для картирования зон взвешенных осадков в водоёмах, лесной таксации. Подходит для выявления пород с содержанием 2-х валентного железа.
Красный	0,63-0,69	Фиксирует содержание хлорофила. С помощью этого метода можно картографировать границы почв и проводить геологическое очерчивание таких объектов, как залежи, рудные тела и нефтяные поля. Он также позволяет идентифицировать видовой состав растений и уровень их стресса.
Ближний ИК	0,76-0,90	Крайне чувствителен к количеству вегетационной биомассы, к содержанию воды в тающих льдах. С его помощью идентифицируются сельхозкультуры, прогнозируется урожайность применяется, для картирования береговой линии водных объектов, выявления зон разрушения льда в период таяния.
Коротковолновый ИК	1,55-1,75	Интенсивность отраженного сигнала помогает отличать облака от снега и льда, причем слабый сигнал указывает на снег, а более яркий – на облака. Используется для мониторинга влажности почв и растительного покрова, при этом сухие поверхности отражают больше сигнала.
Тепловой ИК	10,4-12,5	Используется для определения толщины льда путём фиксации температуры поверхностей, таких как открытая вода и снежно-ледяной покров.
Средневолновый ИК	2,08-2,35	Этот метод эффективен для определения границ и уровня влажности почв, а также состояния растительности. Он также чувствителен к наличию пыли, обнажённым участкам земли и материалам с высоким содержанием кремния. Применяется для

		идентификации гидротермально изменённых зон и различных типов горных пород.
--	--	---

Использование ИСЗ для определения характеристик ледового покрова позволяет добиться погрешности в оценке сплочённости льда вплоть до 1 балла при использовании СВЧ излучения в зимнее время и минимум до 2 баллов в летнее время. Излучения в ИК- и видимом диапазонах дают погрешность в 2-3 балла в любое время года. Так же с помощью ИСЗ производится определение положения кромки льда, его дрейфа и температуры. Все эти измерения выполняются с большой точностью. При измерении с использованием ИК-излучения пользуются такой характеристикой как альbedo.

Альbedo – процент излучения, отражённого телом или поверхностью.

Свежий снег может иметь альbedo до 0.95, а старый – до 0.40.

Возраст ледяных полей определяется через прямые и косвенные признаки. Яркость, форма, размеры и другая информация используется для дешифрования снимков. Оптические изображения позволяют различать однолетние тонкие льды серо-белого или белого цвета, которые обычно представляют собой угловатые и вытянутые формы. В отличие от них, однолетний средний лед может иметь как вытянутые, так и более округлые формы, обычно занимая площади от 2 до 10 км. Толстый однолетний лед чаще всего обладает более округлой формой.

Таблица 2

Комбинации каналов

Комбинация каналов	Особенности и область применения
3-2-1/4-3-2 (R/G/B)	Изображение в естественной палитре цветов. При первоначальном осмотре съемочных материалов обнаруживается, что облака и снег из-за своей белизны трудно различимы. Позволяет анализировать процессы, протекающие в водных объектах, оценивать глубины в мелководной зоне. Также применяется для изучения

	антропогенных объектов.
4-3-2/5-4-3 (Short Wave IR/G/B)	В технике изображения, известной как «ложные цвета», используется уникальная цветовая схема для различения разных элементов ландшафта. Обычно, визуализация городских территорий происходит с использованием синих и голубых оттенков, в то время как растительность часто отображается в красной гамме. Почва же выделяется с помощью коричневых цветов. Лед, снег и облака, как правило, представлены в белых или светло-голубых тонах. Этот метод широко применяется для анализа состояния растительности, влажности почв и состояния лесов, благодаря чему он напоминает традиционную инфракрасную аэрофотосъемку.

С помощью комбинации каналов можно добиваться акцента на необходимые объекты и упрощать визуальные отображения данных.

Для измерения толщины льда используются методы, которые опираются на анализ данных, полученных с помощью инфракрасных радиометров искусственных спутников Земли. Эти методы включают в себя анализ зависимостей температуры поверхности льда от его толщины или применение спутниковой альтиметрии. Примерная толщина льда может быть оценена через анализ спутниковых данных о его возрасте, поскольку возраст льда коррелирует с его толщиной

Для изучения свойств ледовых покрытий эффективно применяются самолётные радиолокационные средства.

Преимущества радиолокационной съёмки:

- слабое влияние метеорологических условия;
- независимость от освещённости земной поверхности;
- высокая детальность.

Данные преимущества позволяют получать информацию оперативно и с высокой периодичностью даже в периоды полярной ночи и сильной облачности. Детальность съёмки позволяет фиксировать ледовые объекты размера до 20 на 20 метров, а также определять их морфометрические характеристики

На данный момент, наиболее надёжным способом обнаружения стамух

является анализ и обработка данных со спутников опытным ледовым экспертом. При дешифровании снимков он учитывает особенности ледового режима, метеорологические особенности района и гидрологические особенности моря

Стамухи на спутниковых снимках определяются с помощью следующих признаков:

- неизменное географическое положение относительно непрерывно дрейфующего льда;
- наличие пространства с чистой водой с подветренной стороны стамухи, которое меняет своё положение с изменением ветра;
- высокая плотность битого льда перед стамухой посреди больших и относительно ровных полей дрейфующего льда.

На данный момент, услуги спутникового мониторинга на уровне непосредственного сотрудничества с космическими программами различных стран предоставляет такая компания как «СканЭкс». Оказание услуг производится на коммерческой основе. Возможен мониторинг ледовой обстановки.

Ещё одна компания – «Vizard», также оказывает коммерческие услуги по мониторингу и прогнозированию ледовой обстановки (рис.10).

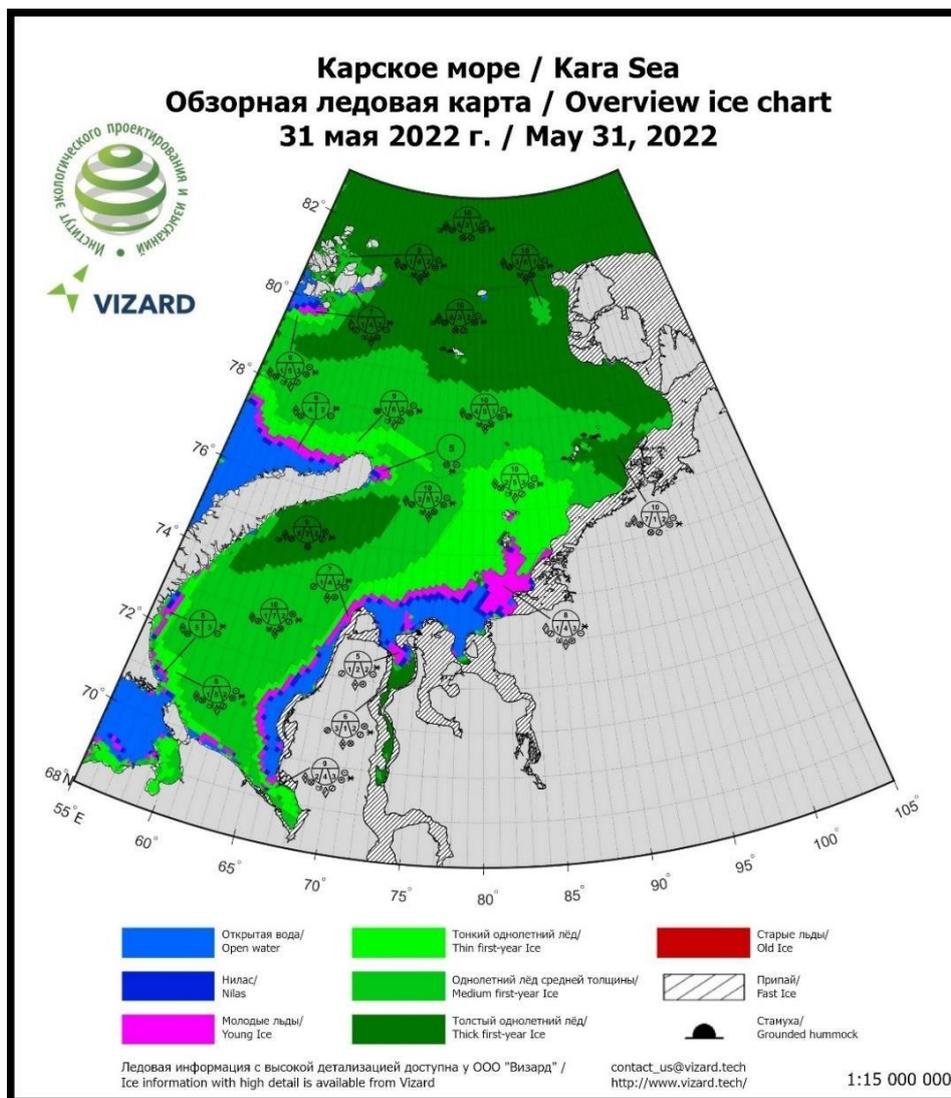


Рис.10. Демонстрация обзорной ледовой карты производства компании «Vizard»

Данная компания с февраля 2022 года начала сотрудничество с ФГБУ «Администрация Северного морского пути» (АСМП), предоставляя ей ледовые карты, такие как на рисунке 22, и прогнозы ледовой обстановки[8] .

1.2 Стамухи и торосы арктических морей

Наиболее часто торосы и стамухи встречаются в арктических морях. Акватория в этом районе покрыта льдом наибольшую часть года, с октября по май.

На рисунке 11 показана одна из стамух Северного Ледовитого океана.



Рис. 11. Стамуха

В последнее время начались интенсивные исследования больших торосистых образований, таких как торосы и стамухи, с целью получения подробной информации об их структуре и морфометрических характеристиках. Эти знания крайне важны для осуществления хозяйственной деятельности в Арктической зоне, так как перемещение этих массивных ледяных образований может наносить ущерб морской инфраструктуре. Исследования помогают выявлять закономерности в распределении и особенностях внутреннего строения торосов, что имеет важное значение в обеспечении безопасности и эффективности арктической эксплуатации морской инженерной инфраструктуры[9].

Когда стамухи отрываются от грунта и начинают дрейфовать, они становятся значительно более опасными из-за своей увеличенной массы по сравнению с тем, как они держатся на поверхности. Чтобы адекватно спроектировать защитные сооружения для морских объектов и оценить потенциальные нагрузки, крайне важно иметь информацию о геометрических размерах этих ледяных формаций, их пористости, толщине консолидированного слоя и других параметрах. Исследование льда в течение последних тридцати лет, как внутри России, так и на международном уровне, значительно расширило наше понимание его физических и механических свойств. Эти знания оказались особенно важными для развития арктического шельфа.

Исследовательские работы в этой области часто включают сложные методы анализа различных аспектов, основанные на разнообразных физических принципах, чтобы глубже понять характеристики ледяного покрова, что является основной причиной для проведения таких масштабных научных исследований.

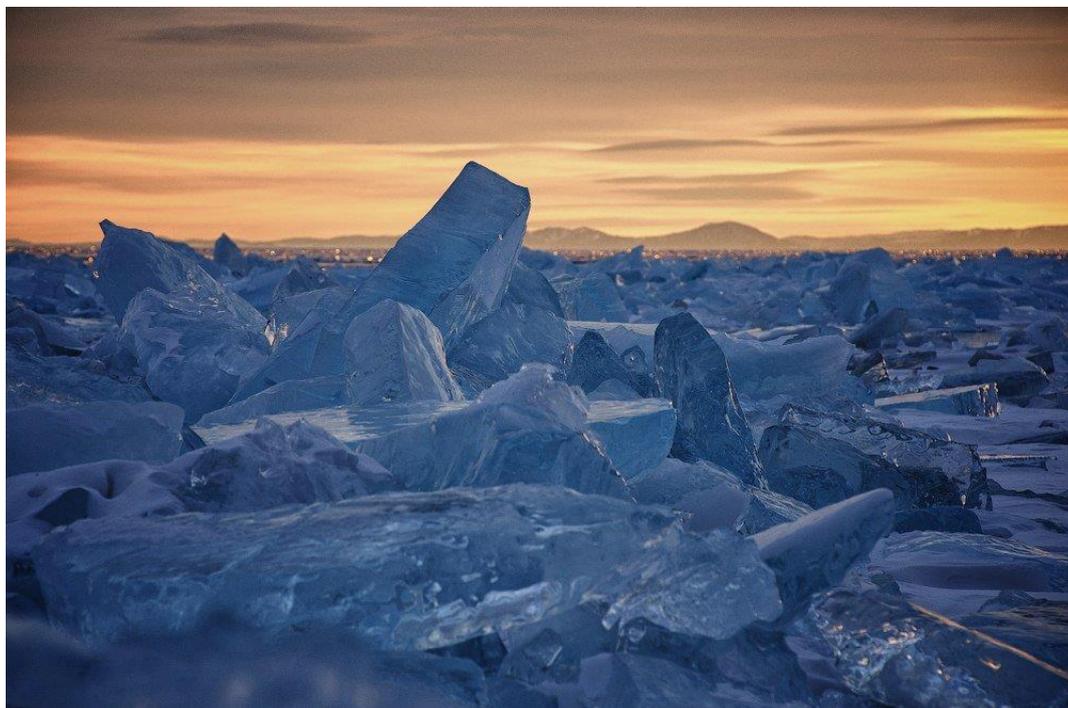


Рис12. Торосы арктических морей

Рассмотрим распределения стамух и торосов на примере Арктического бассейна.

1.2.1 Стамухи арктических морей

В арктических морях России, особенно в мелководных зонах, часто встречаются стамухи, известные также как торосистые ледяные образования. Эти ледяные структуры могут формироваться зимой, как единичные объекты или в группах, и часто находятся на мелководье. Особенно они распространены в юго-восточной части Баренцева и Карского морей, а также в северной части Баренцева моря. Стамухи часто формируются у берегов или на границе припая под воздействием движущегося льда. Если припай продолжает развиваться, эти образования могут оказаться замерзшими в стационарном льду. Однако, если припай получает повреждения, большие торосистые ледяные массы могут отделиться и дрейфовать в открытое море, создавая значительные риски для

морских сооружений и навигации, особенно при недостаточной видимости. Стамухи могут также образовываться на мелководьях в открытой морской акватории. В этом районе присутствуют как отдельные структуры, так и целые их скопления. Летом, когда уровень моря падает, дрейфующие льдины могут достигать мелководья, где временно формируются ледяные скопления. Кроме того, здесь встречаются торосы, расположенные на земле, создавая ледяные преграды.

Стамухи играют ключевую роль в динамике движения ледяных масс, регулируя их скорость и направление, что влияет на скорость и особенности их перемещения. Их функция как «якорей» способствует более быстрому формированию припая в холодные месяцы года, а весной помогает предотвратить его разрушение. Также считается, что стамухи могут воздействовать на промерзание почвы. В связи с этим, при разработке, строительстве и использовании водохранилищ и других гидротехнических объектов в арктических регионах необходимо учитывать влияние стамух[10].

На рисунке 13 показан схематичный вид стамух.

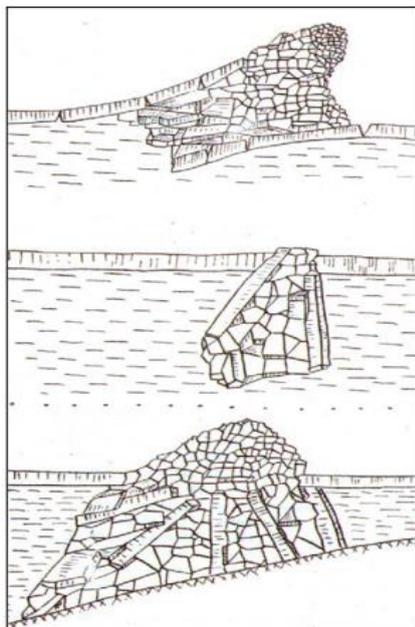


Рис.13. Схематическое представление механизма формирования стамух или подводных плотин из набивного льда

1.2.2. Торосы Арктических морей

Торосы представляют собой неупорядоченные скопления морского льда, возникающие в результате его сжатия и частичного замерзания на поверхности

воды. Адмирал С.О. Макаров в 1899 году на ледоколе «Ермак» впервые пробурил эти ледяные массы, стремясь изучить их внутреннюю структуру и уровень погружения. С начала 1930-х годов исследования торосов стали проводиться с помощью авиации, а к 1970-м годам были введены новые технологические методы для их изучения. Существует два основных подхода к анализу размеров и формы торосов: непрерывное сканирование ледяной поверхности и точечные измерения отдельных образований.

Методы, такие как лазерные профилометры, аэрофотосъемка и сонары, используются для получения данных о расположении и направлении ледяных гряд. Однако они ограничены в своей способности анализировать лед, так как могут исследовать только одну сторону ледяного покрова – верхнюю или нижнюю. Это ограничение делает их неспособными одновременно оценить как верхние, так и нижние части отдельного тороса. В то время как детальное прямое измерение каждого тороса может предоставить полную информацию о его структуре, такой подход требует значительных ресурсов и времени, что делает его непрактичным для широкомасштабных исследований.

На рисунке 14 изображена схема внутреннего строения тороса

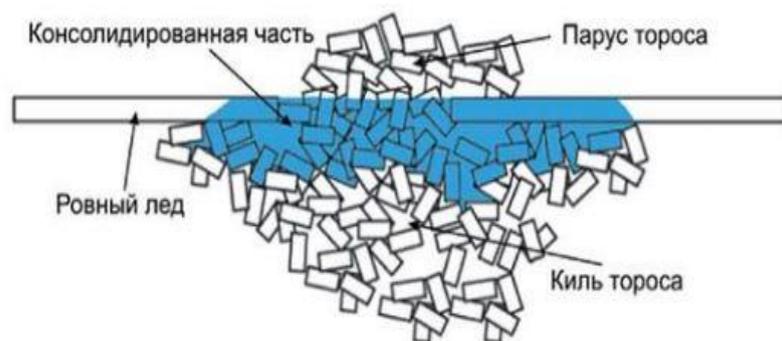


Рис. 14 Схема тороса

В полярных регионах и замерзающих морях часто наблюдается явление образования торосов. Этот процесс начинается, когда между льдинами происходит контакт, а на лед начинают действовать силы сжатия и сдвига, которые превосходят установленные критические пределы. В результате этого лед ломается, что способствует формированию торосов.

Ледяные формации, известные как торосы, могут появляться из-за давления между льдинами или вследствие касательного трения. Эти структуры обычно

представляют собой длинные гряды, которые могут простираются на большие расстояния. В зависимости от условий, высота торосов может колебаться от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров, при этом их глубина может достигать десятков метров. Существует два основных типа торосов: первый характеризуется случайно скопленными крупными кусками льда, второй же представляет собой более ровные и длинные гряды из мелко раздробленного льда. Изучение этих ледяных образований стало более активным за последние десять лет из-за необходимости разработки природных ресурсов арктического шельфа.

1.3 Современное состояние исследования торосов и стамух

Стамуха – это уникальная и сложная ледяная структура, простирающаяся на сотни метров и обладающая необычной формой. Это препятствие значительно осложняет мореплавание, однако её можно использовать для защиты от дрейфующих льдов или при создании искусственных ледяных конструкций. Изучение стамух требует значительных ресурсов как в материальном, так и во временном плане, так как она имеет специфические особенности, такие как: протяженность на сотни метров, контакт с грунтом и наличие дополнительного паруса, что усугубляет сложность её исследования[13].

Для того чтобы глубоко понять структуру стамух, необходимо применять комплексные и различные методы исследования. Это включает в себя не только создание 3D моделей, но и детальный анализ как блоки распределяются внутри стамухи. Кроме того, важно изучить, как киль стамухи взаимодействует с почвенным покрытием, а также анализировать связи между блоками в парусе и КС. Ключевым методом является термобурение, обеспечивающее детальное представление о внутренней структуре стамух. Однако, хотя термобурение позволяет узнать внешние размеры стамухи, ограниченное число секущих профилей делает эту информацию неполной. Использование гидролокатора, геодезической и аэрофотосъемки значительно способствует определению пространственных координат поверхности стамухи. Эти технологии помогают выявить форму, размер и объем стамухи. Кроме того, применение

электромагнитного измерителя EM31 Ice, который работает на высокой частоте, позволяет в цифровом формате получать данные о толщине окружающего льда на плоской местности. Для точного определения границы между льдом и землей во время бурения, настоятельно советуется применять термобуры, которые измеряют температуру или чистоту воды, образовавшейся в результате таяния. Это особенно важно при переходе из замерзшей среды в грунт. Для визуализации формы и поверхности кия тороса используют термобурение в сочетании с гидролокатором, что позволяет исследователям анализировать данные с устройств. Вместе с тем, для непосредственного наблюдения кия стамухи необходимо использовать специальное подводное оборудование для съемки, что позволяет выявить уникальные детали структуры кия, которые могли остаться незамеченными при других методах исследования. Исследование структуры и физических свойств льда через выборочные керны помогает изучить распределение его физических параметров внутри стамухи, преимущественно в консолидированном слое. Этот метод дает возможность воссоздать процесс торошения, хотя и не предоставляет полного понимания о метрических характеристиках стамухи.

Для анализа структуры и текстуры стамухов, а также для оценки их местной прочности, предлагается провести ряд экспериментов. Для исследования структурных и текстурных характеристик керна из консолидированного слоя, используется специальное оборудование для керна бурения льда. Оно устанавливается на заранее подготовленной площадке, расположенной в центре овальной стамухи, которая создана с помощью водяного ледореза. При установке оборудования на верхнюю поверхность керна станции необходимо строго соблюдать меры безопасности. Исследование керна особенно важно для неконсолидированной части кия, так как из-за давления льда эта область может быть более пористой

или менее прочной по сравнению с другими участками.

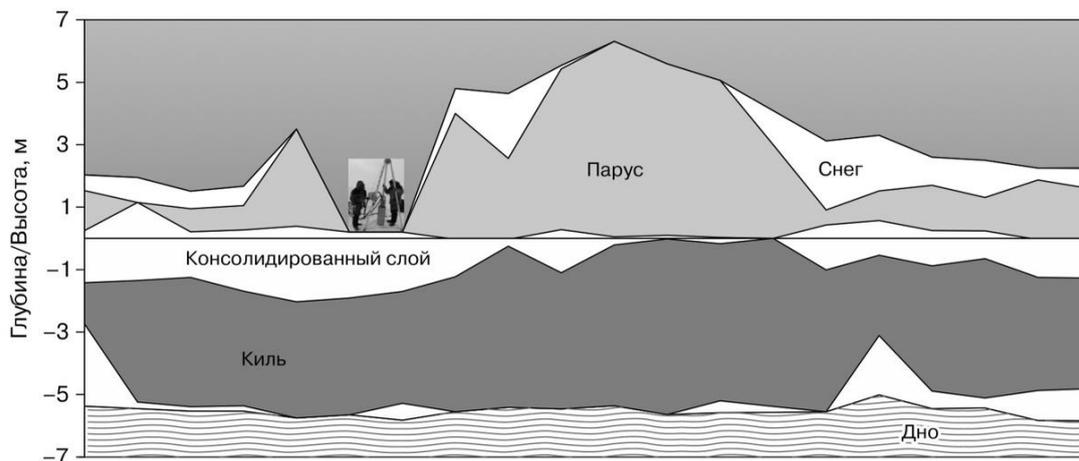


Рис.15 Схема эксперимента по исследованию строения киль стамухи.

Используя ледорез, специалист производит разрез в наиболее интересном с точки зрения происхождения стамухи участке паруса, при этом блоки, которые были отделены, удаляются. Специалист при осуществлении данного процесса должен находиться на верху паруса для обеспечения безопасности и предотвращения несчастных случаев во время разделения блоков на выбранном участке, который интересен с точки зрения его происхождения. После того как отделенная часть паруса будет удалена, проводится фотографирование срезанной стенки, чтобы зафиксировать результаты работы [14].

Исследование ледяных блоков на изображениях позволяет оценить пористость паруса, анализируя их относительную площадь. Кроме того, для полного понимания метеорологических условий в районе проведения работ необходимо осуществить океанографические исследования, измерить глубины в районе стамухи и взять образцы грунта. Важно также учесть метеорологические данные за период с начала формирования льда. В результате движения и торошения льда в его покрове возникают различные колебания и волны, распространяющиеся по всей его толще.

В данный момент привлекает внимание изучение вибраций льда, происходящих как вокруг стамухи, так и внутри неё. Исследование этих колебаний включает анализ размеров ледяных масс, структуры блоков льда, их взаимодействия с подстилающим грунтом, а также оценку влияния морских

приливов и отливов, степени замерзания различных частей стамухи и других факторов.

Исследование ледяных блоков на изображениях позволяет оценить пористость паруса, анализируя их относительную площадь. Кроме того, для полного понимания метеорологических условий в районе проведения работ необходимо осуществить океанографические исследования, измерить глубины в районе стамухи и взять образцы грунта. Важно также учесть метеорологические данные за период с начала формирования льда. В результате движения и торошения льда в его покрове возникают различные колебания и волны, распространяющиеся по всей его толще. В данный момент привлекает внимание изучение вибраций льда, происходящих как вокруг стамухи, так и внутри неё. Исследование этих колебаний включает анализ размеров ледяных масс, структуры блоков льда, их взаимодействия с подстилающим грунтом, а также оценку влияния морских приливов и отливов, степени замерзания различных частей стамухи и других факторов[15]

Информация, представленная Всемирной метеорологической организацией, выделяет три типа торосов. Прежде всего, это молодые торосы, которые еще не прошли через процесс летнего таяния и называются «свежими» или однолетними. Второй тип - это «weathered» торосы, которые уже испытали весеннее таяние и являются более старыми. Обычно торосы составляют от 10 до 40% от всего объема ледяного покрова и могут быть весьма объемными. В условиях уменьшения многолетнего льда, редкие формации торосов, сформированные исключительно из многолетнего льда, могут достигать толщины до 40-50 метров. Чтобы справиться с задачей, применяется техника, которая включает в себя разделение процесса на три уникальных сегмента. Один из сегментов – это парус, созданный из соединенных блоков льда и мелких кусочков, которые спаялись при контакте с водой.

Киль подводной части состоит из двух частей:

– консолидированный слой килля образуется на уровне ватерлинии, когда вода замерзает между неровными ледяными блоками. Этот участок плотного

льда интегрирует эти блоки в одно целое, приобретая прочность, аналогичную прочности ровного льда, благодаря воздействию холодных температур;

– блоки и фрагменты льда, находящиеся под защитным слоем, соединены вместе в местах их касания, образуя часть киля. Пространства между этими блоками обычно заполнены морской водой или шугой. В самом начале зимы, когда лед еще не достиг значительной толщины, его дрейф происходит относительно медленно, а торосы формируются не так интенсивно, что дает возможность заметить увеличение консолидированного слоя. Со временем, когда лед утолщается, его перемещение ускоряется, что способствует созданию более крупных торосов. В таких условиях сокращается период, необходимый для их слияния. Торосы отличаются множеством форм и размеров. Традиционно, парус этих конструкций обладает треугольным поперечным сечением, в то время как киль может быть трапециевидным или представлять собой трапецию. Каждая из этих форм обусловлена различными характеристиками, такими как ширина основания, высота и угол наклона.

Киль, имеющий форму, сопоставимую с парусом, продолжается под однородным слоем льда, который охватывает торос. Необходимо понимать, что треугольная или трапециевидная конфигурация часто встречается у типичных торосов. Некоторые ученые предполагают, что реальнее киль обладает стабильной скоростью, а не треугольной формой. Структуру торосов формируют ледяные обломки, сливающиеся в единое целое. Ледяные обломки разнообразных размеров и форм, когда они замерзают вместе, создают сложную трехмерную структуру торосистого образования. Эти фрагменты льда расположены в пространстве случайным образом. В результате формируется ледяной каркас. Исследование ледяных образований, включая торосы, осуществляется через разнообразные техники, в том числе бурение скважин и анализ их геометрической структуры. Торосы, сложенные блоками льда, могут включать в себя элементы, такие как вода, снег, шуга, а также ил и донные отложения, известные как стамухи. Для точного измерения высоты снега и льда над водой используются как геодезическая съемка, так и специализированные измерители уровня воды. Также в исследованиях применяются современные

подводные телеметрические системы и сонары, позволяющие получить детальные данные о поверхности льда. При проведении бурения сбор информации дает возможность оценить объемы как видимой, так и скрытой под водой частей айсбергов. Исследования помогают установить не только границы и пустоты в структуре льда, но и различия в его пористости. Внедрение подводных телеметрических систем облегчает процесс определения формы и размеров ледяных масс, включая наличие воздушных карманов и масштабные блоки льда, формирующие киль торосистого льда. Данные о размерах этих блоков, составляющих так называемый «парус» ледника, необходимы для создания детальных моделей распределения этих элементов в ледяном покрове. Изучая соотношение толщины блоков льда и толщины гладкого льда, можно сделать выводы о возможном возрасте ледникового покрова.

1.4 Вывод по главе 1

В главе 1 рассмотрены используемые методы определения ледовых опасностей с помощью ледовой разведки. Так же отмечены задачи ледовой разведки. Наиболее эффективный метод ледовой разведки метод дистанционного зондирования земли.

Приведены определения, основные понятия и характеристики стамух и торосов арктических морей. Описаны причины возникновения и влияния торосов и стамух на мореплавание и хозяйственную деятельность.

Рассмотрены современные методы исследования торосов и стамух. Определен наиболее актуальный метод исследования – метод термобурения.

Глава 2. Метод термобурения

2.1 Технические средства термобурения

Исследование ледников и других ледяных структур часто включает методы бурения, применяемые уже с 19 века, когда начались научные работы по альпийским ледникам с использованием теплового бурения-плавления. Среди различных техник бурения выделяются механическое бурение с помощью мотобура, электромеханическое бурение, электротермобурение и водяное термобурение, каждое из которых подходит для изучения разных типов ледяных формаций, включая торосы и стамухи. Помимо самого процесса бурения, важной частью исследований является измерение высоты снежного или ледяного покрова, для чего используют либо специальные устройства для измерения уровня воды в скважинах, либо геодезическую съемку с последующей привязкой к уровню воды. Используемые в ледовых экспедициях механические буровые установки, обладающие мобильностью и простотой эксплуатации при наличии нужных навыков, включают в себя шнеки двухдюймового размера без керна и керноотборники различных размеров от разных производителей. Однако, несмотря на их эффективность, процесс бурения может занять значительное время из-за увеличивающейся толщины льда. Такое оборудование часто используется в исследованиях льда благодаря его способности длительно находиться на ледовых полях с ограниченной нагрузкой. В нашей стране, как и во многих других, широко распространены различные экологические исследования, связанные с изучением ледников. Одной из ключевых проблем при использовании мотобуров является невозможность зрительно определить качество и границы льда, а также наличие воздушных пустот. К тому же, данные о скорости бурения обычно не фиксируются. В начале процесса бурения осуществляется механическое воздействие на скважину, но по мере увеличения глубины и сложности работ, переходят к использованию термических методов для продолжения бурения, что влечет за собой увеличение числа необходимых операций[16].

Применение горячей воды в процессах бурения на территориях, покрытых ледниками, широко распространено среди ученых, включая отечественных и зарубежных. Этот метод был впервые применен для изучения ледников. Известные международные ученые, такие как О. Ковакс и В. Сент-Лоуренс, активно используют водяные установки в своих ледовых экспедициях.

У водяного термобура есть несколько важных преимуществ перед электрическим:

- скорость бурения увеличивается примерно в 20 раз;
- слой грязи, который является грязным, легко преодолевается;
- водяной термобур не способен перегреться или перегореть.

Использование воды в качестве энергетического ресурса встречает определенные трудности, особенно из-за того, что необходимое для этого оборудование обладает большими размерами и весом, что затрудняет его обслуживание и удлиняет процесс. Более того, в условиях холода эти проблемы становятся еще более ощутимыми. Транспортировка таких установок по замерзшим поверхностям может потребовать усилий от двух до шести человек. Кроме того, водяные буры обладают ограниченной точностью, что позволяет обнаруживать только большие ледяные образования, а меньшие частицы льда часто не удается идентифицировать и они записываются как неструктурированный слой. Когда используется буровая коронка конической формы, это приводит к небольшой ошибке (до 20 см) в точности определения глубины ледяных блоков. Подобно работе с механическим буром, ключевая проблема заключается в трудностях с визуализацией границ и пустот в льду, а также в различении качества ледяных массивов. В ходе полевых работ на море Бофорта в 1995 году и на шельфе у острова Сахалин с 1995 по 1998 годы, использовался метод теплового бурения с использованием горячей воды для исследования многолетних дрейфующих льдов, торосов и стамух. Интересно, что иностранные специалисты по ледовым исследованиям не фиксируют скорость бурения в ходе своей работы. Во время бурения скважин для определения пористости льда и выявления пустот использовался водяной

термобур от компании Polar Alpine, Inc., причем ключевую роль играла чувствительность оператора буровой установки[17].

В 1980-х и 1990-х годах специалисты из СахНИПИморнефть активно занимались изучением льда, применяя метод водного бурения с использованием самодельной установки. В то время скорость бурения не фиксировалась. В учреждении ААНИИ для повышения эффективности работ были внедрены инновации, включая установку Морева с водяным охлаждением, которая допускала одновременное использование двух буровых установок. Это способствовало росту производительности труда. Также в ААНИИ разработали торцевую буровую коронку, в отличие от более сложных зарубежных термобуров. Это нововведение позволило улучшить точность определения границ блоков льда. Хотя в России широко используется метод электротермобурения для изучения льда, за пределами страны этот метод не получил широкого признания[18].

Электротермобуры, разработанные Горным Университетом и ААНИИ, отличаются простотой управления, мобильностью и легкостью, позволяя одному оператору управлять установкой. Эти устройства обладают высокоэффективным нагревательным элементом, который упрощает процесс определения границ блоков льда без увеличения веса. Первоначально электротермобуры применялись для бурения скважин, чтобы измерять толщину льда, обнаруживать пустоты, извлекать керн и проводить его анализ. Основным ограничением электротермобура является его медленная скорость бурения. В 1972 году А.Л. Суханов внедрил методику теплового бурения для измерения плотности льда на горных ледниках. Со временем стало очевидно, что этот процесс позволяет точно определять характеристики льда. Этот метод анализа включает использование термобура, который нагревается и погружается в снежно-ледяной слой. Сначала термобур работает на определенной глубине, после чего регистрируется продолжительность его активности и плотность льда с использованием специальной градуировочной кривой. Процесс бурения подвержен воздействию множества факторов, среди которых можно выделить содержание моренного материала на нижних уровнях, плотность льда на

верхних слоях и температуру активного слоя, находящегося в середине. Метод позволяет определять эти параметры путем отслеживания изменений скорости бурения на разных глубинах. Кроме того, анализируя колебания уровня воды в скважине во время работ, можно судить о наличии трещин и степени водонасыщенности ледника. В период с 1985 по 1995 года исследовательская группа СахалинНИПИморнефть под руководством С.П. Бекецкого занималась анализом морфологических особенностей ледяных образований, таких как торосы и стамухи. Эти данные предназначались для оценки потенциальных рисков для гидротехнических сооружений и подводных коммуникаций. Работа включала геодезические измерения, термобурение и извлечение керна для глубокого изучения структуры торосов и определения, насколько глубоко стамухи могут проникать в почву. Для этого были выполнены буровые работы, строго соответствующие параметрам ледяных образований. В ходе выполнения специализированных работ применялась термобура от Горного университета. Аппарат, обладающий массой 50 кг, имеет снаряд весом 12,8 кг. Он потребляет энергию в размере 1.5 кВт. Способности бура позволяют ему проникать на глубину до 50 метров, вырезая керн диаметром 65 мм и продвигаясь со скоростью 3 метра в час[19].

При изучении торосистого льда через метод бурения с извлечением керна, который позволяет оценивать его внутреннюю структуру, включая размеры блоков и присутствие пустот, а также физические и физико-механические аспекты, такие как температура, соленость, текстура и прочность, сталкиваются с определенными проблемами. Результаты, о которых упоминает С.П. Бекецкий, вызывают дополнительные вопросы. Они основаны на данных, полученных от керна с диаметром всего 65 мм, выдолбленного методом теплового бурения, что ставит под сомнение точность и достоверность измерений критических параметров, таких как температура льда и его сопротивление сжатию и изгибу. В процессе разметки сети будущих буровых точек использовались данные, полученные из опорных скважин. В ходе бурения применялась термоигла, функционирующая на горячей воде. Наблюдения и записи велись на протяжении всего процесса: отслеживались скорость работы термоиглы и её

прочностные характеристики, а также фиксировались размеры и границы ледяных образований и воздушных пустот. Была измерена толщина уплотненного слоя льда на уровне моря. По завершении бурения каждой из скважин проводилось измерение уровня воды, а также собирались почвенные образцы с окружающих площадок для анализа их физико-механических свойств.

С начала 1996 года в исследованиях ледяных образований, таких как торосы, используется передовой бескерновый электротермобур производства ААНИИ. Этот инструмент, оборудованный конической нагревательной коронкой, значительно улучшил процесс изучения. К 2002 году бурение осуществлялось с применением электричества или горячей воды. Команда ААНИИ не только занимается установкой такого оборудования, но и тщательно мониторит различные операционные параметры, включая скорость бурения, давление и температуру воды. Это позволяет более детально анализировать внутреннее строение торосов и стамух.

Инструменты, используемые для определения параметров бурения, подходят для различных методов, включая водяное и электротермобурение, подчеркивая их многофункциональность. В процессе термобурения собираемые данные позволяют автоматически выявлять геологические границы, минимизируя человеческую ошибку. Это охватывает идентификацию границ ледяных блоков, определение плотных слоев в грунте и различение контактной зоны между льдом и землей при осуществлении глубоких бурений[20].

2.2 Методы электротермобурения и бурения горячей водой

2.2.1 Электротермобурение

На рисунке 16 представлена диаграмма устройства, используемого для бурения льда с помощью электротепловой технологии, включая отображение скорости перемещения. Модель электрического термобура ЭТИ-3М, оснащена конусной нагревательной коронкой на одной стороне и буровым кабелем на другой. Этот инструмент может работать от бензогенератора или подключаться

к 220 В сети через контрольный пульт, связанный с электронным блоком и компьютером. Внутри бурового кабеля находится не только электрическая проводка, но и специальная трубка, предназначенная для определения уровня давления воды на дне скважины.

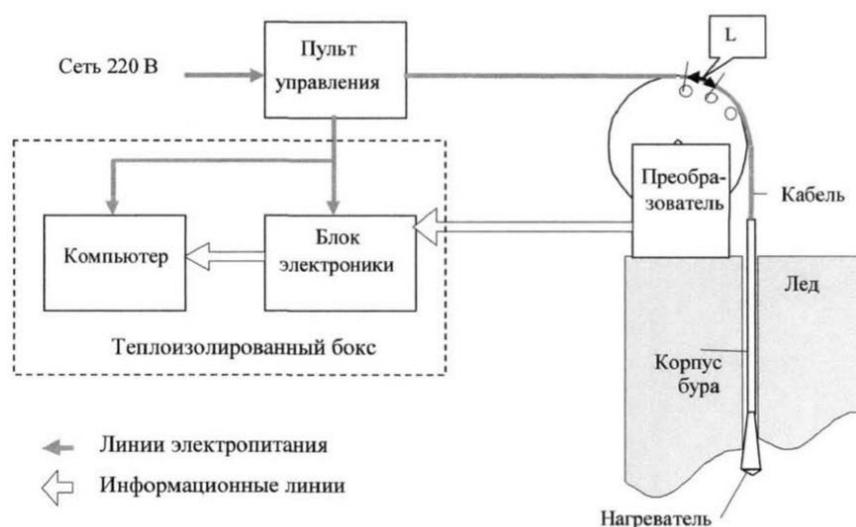


Рис.16 Схема установки для электротермобурения льда с записью скорости бурения

Возможность плавной и ступенчатой регулировки мощности на термобуре обеспечивается пультом управления, расположенным на пульте управления. Защита от перегрузки также осуществляется им. Для создания комфортных условий работы компьютера и электроники используется теплоизолированный бокс. Измерение скорости бурения, давления и температуры воды, а также передача этих данных на компьютер IBM PC осуществляется интегрированным блоком электроники через интерфейс RS-232[21].

Технические характеристики электротермобуровой установки представлены в таблице 3

Таблица 3

Технические характеристики электротермобуровой установки

Диаметр нагревательной коронки термобура, см	3,5
Длина снаряда, см	180
Диаметр скважины, см	3,8-4,5
Потребляемая мощность, кВт	2
Скорость бурения на плотном чистом льду, м/ч	1

	6-18
Дискретность измерения глубины, см	0 ,2- 1,4
Относительная погрешность определения глубины не более, %	0 ,5
Относительная погрешность измерения скорости для $V < 1$ см/с не более, %	4
Пространственное разрешение нагревательной коронки, см	1
Минимальный радиус кривизны скважины, см	2 400
Масса снаряда без кабеля, кг	2 ,3
Общий вес установки, кг	2 0
Обслуживающий персонал, чел	1

Модификация с двумя конусами для нагрева была разработана на основе электротермобура, способного работать на торосах. В процессе бурения, в течение которого происходит разогрев талой воды и плавление шуговых пробок, 15-20% тепла подводится к боковой поверхности верхнего усеченного конуса. Рабочая поверхность, обеспечивающая 80-85% необходимого тепла для бурения, получается с использованием нижнего конуса. Данная схема представляет собой тепловые потоки, которые изображены на рис. 17.

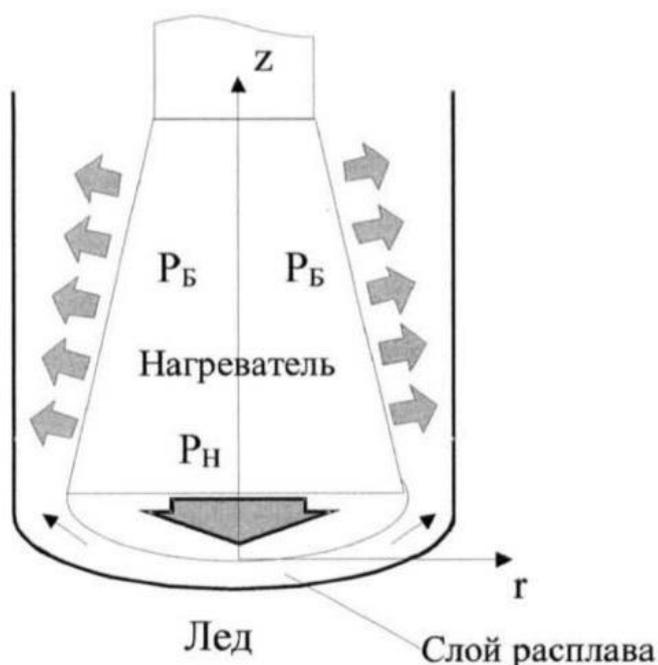


Рис.17 Схема тепловых потоков в нагревательной коронке термобура

При включении программы и подаче питания на бур начинается процесс бурения, в ходе которого регистрируются все параметры, необходимые для дальнейшей работы. При выполнении буровых работ оператор должен уделять внимание не только состоянию энергоподающего кабеля для термобура, но и за состоянием обмотки измерительного колеса. Кроме того, важно следить за процессом фиксации данных на компьютер. По завершении работы необходимо аккуратно записать в журнал информацию о дате проведения, номере бурового участка, линии бурения и точных координатах глубины снега, которые отображаются на карте[22]. Если термобур застрял в скважине, ему подается половина мощности, и благодаря конусовидной форме коронки, его легко удалить из скважины при подъеме.

В устройстве, заключённом в пластиковый корпус, находится электронное оборудование для измерения водного уровня, которое соединено с металлическим щупом посредством кабеля с метками. Оно функционирует благодаря замыканию электрической цепи при контакте с водой, при этом питание осуществляется от батареи. Нормальное состояние цепи означает, что она замкнута. Щуп, соединённый с меченым кабелем, опускается в водоём, и в случае соприкосновения с водой активируются индикаторная лампа и звуковой сигнал. Это позволяет оператору, используя кабель, определить глубину воды относительно уровня земли.

2.2.2 Бурение горячей водой

На базе ААНИИ была создана уникальная термобуровая установка, способная осуществлять бурение торосов и стамух с применением горячей воды. Важной особенностью данной установки является возможность автоматической записи данных о ходе работы на компьютер. Рисунок 18 представляет собой схему установки.

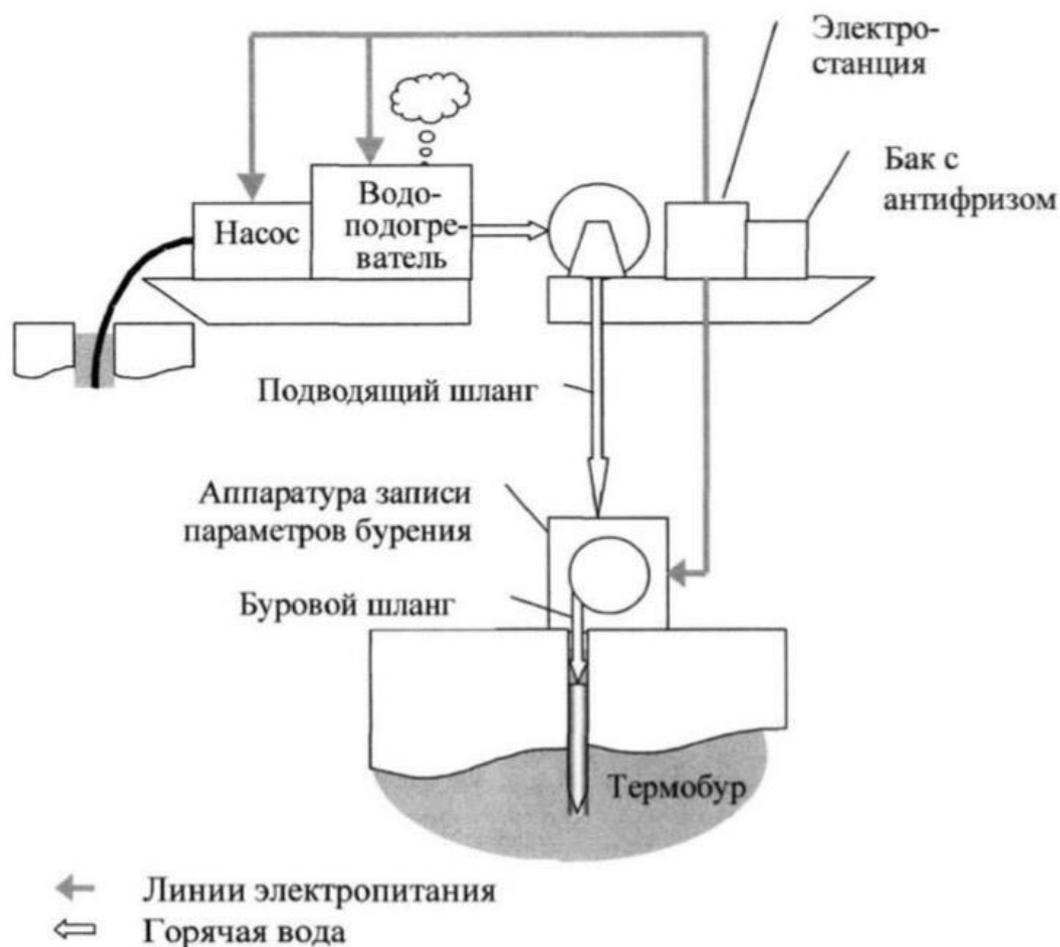


Рис. 18 -схема установки для водяного термобурения

Состав установки термобурения включает в себя:

- водоподогреватель мощностью 85 кВт, работающий на дизельном топливе;
- подающие электронасосы мощностью 0,6 и 1,1 кВт;
- подводящий шланг 80 м на вьюшке;
- термобур с буровым шлангом;
- измерительный бокс с аппаратурой для записи параметров бурения на компьютер;
- электростанция мощностью 2 кВт;
- бак с антифризом.

Чтобы нагреть морскую воду до 70-80 °С, используются электрические насосы, которые перекачивают воду через водоподогреватель. Затем эта горячая вода транспортируется по буровому шлангу в измерительный бокс. В верхней

части бокса установлены различные устройства, включая компьютер, блок электроники, преобразователь перемещения бура, а также датчики давления и температуры воды. В нижней части бокса размещена водяная арматура. Во время бурения льда измерительный бокс фиксируется к льду с помощью штыка на днище. Таким образом, горячая вода подается в термобур. Во льду образуется углубление под действием струй воды, вытекающих из буровой коронки. Стенка скважины плавится отработанной водой, которая поднимается вверх вместе с талой. В начале процесса бурения измерительное колесо преобразователя вращает буровой шланг и сам бур. Буроуправляющий шланг имеет структуру с резиновой трубкой, в которой располагается фторопластовая трубка с отверстием для спирали из нержавеющей проволоки. В термобуре для подсоединения водяного температурного датчика к спирали применяют два провода. На заднем конце бурового шланга установлена разделительная коробочка. Для того чтобы защитить электрические провода от воздействия воздуха и воды, разработана специальная изоляционная система[23].

Таблица 4

Технические характеристики водяной термобуровой установки

Тепловая мощность водоподогревателя, кВт	85
Температура подаваемой в термобур воды, °С	65-70
Расход воды, л/ч	700
Давление воды на выходе водоподогревателя, кг/см	10
Диаметр нагревательной коронки термоиглы, см	2,4
Длина снаряда, см	175
Диаметр скважины, см	2,5-4,5
Потребляемая электрическая мощность, кВт	2
Скорость бурения плотного льда, м/мин	1,5-3
Скорость бурения рыхлого льда, м/мин	3-6
Скорость бурения слабого разрушающегося льда, м/мин	6-20
Дискретность измерения глубины, см	0,4
Относительная погрешность определения глубины не более, %	0,5
Затраты времени на подготовку установки к работе, мин	30
Затраты времени на подготовку установки к транспортировке, мин	30

Масса термобура с буровым шлангом, к	12
Общий вес установки, кг	340
Обслуживающий персонал, чел	3

Электричество от 2-киловаттного генератора на 220 В, задействованного для работы пульта управления, направляется к электронному блоку и компьютеру установки. Пульт управления обеспечивает не только мониторинг и защиту системы, но и позволяет точно регулировать температуру воды, которая используется в термобуре.

Оператор контролирует функционирование водонагревателя через систему управления, которая автоматизирована. Во время бурения, выполняемого двумя сотрудниками, осуществляется контроль за уровнем воды. Во время перехода к новой точке бурения, из установки не перестает течь горячая вода. Кратковременная остановка потока воды на пару секунд для замены бурового инструмента не замедляет процесс бурения и не оказывает значительного влияния на температуру воды в скважине.

Большую часть времени, необходимого для водяного бурения, занимает перемещение между различными местами бурения, что составляет примерно 80% от всего времени процесса. Сам процесс бурения, включая работу через разные слои льда и справляясь с неровностями поверхности, особенно в областях стамух, занимает всего около 20% времени. Скорость бурения варьируется и составляет в среднем от 17 до 19 метров в минуту.

Процесс бурения скважин выполняется с сохранением постоянной мощности, а также стабильными параметрами потребления воды и ее температуры. В системе электротермического бурения методы расчета скорости и установление градуировочных коэффициентов применяются по сходной схеме.

Во время проведения полевых исследований в различных областях подтвердилась эффективность использования буровой установки с функцией записи параметров и способность этого оборудования собирать информацию[24].

2.3 Методика определения участков плотного и рыхлого льда, границ пустот

Осуществляя бурение скважин, необходимо поддерживать постоянную тепловую мощность или учитывать ее изменения в процессе работы. Это важно для точной диагностики состава скважины, поскольку скорость проникновения бура может указывать на различия в плотности и структуре льда, включая обнаружение пустот и зон с рыхлым или плотным льдом.

Когда термобур используется на льду, где присутствуют торосы и стамухи с различной пористостью и включениями снега, шуги, воды или воздуха в пустотах, его скорость погружения может значительно увеличиваться из-за этих условий. Данный разброс иллюстрируется гистограммами, расположенными на рисунках 19 и 20.

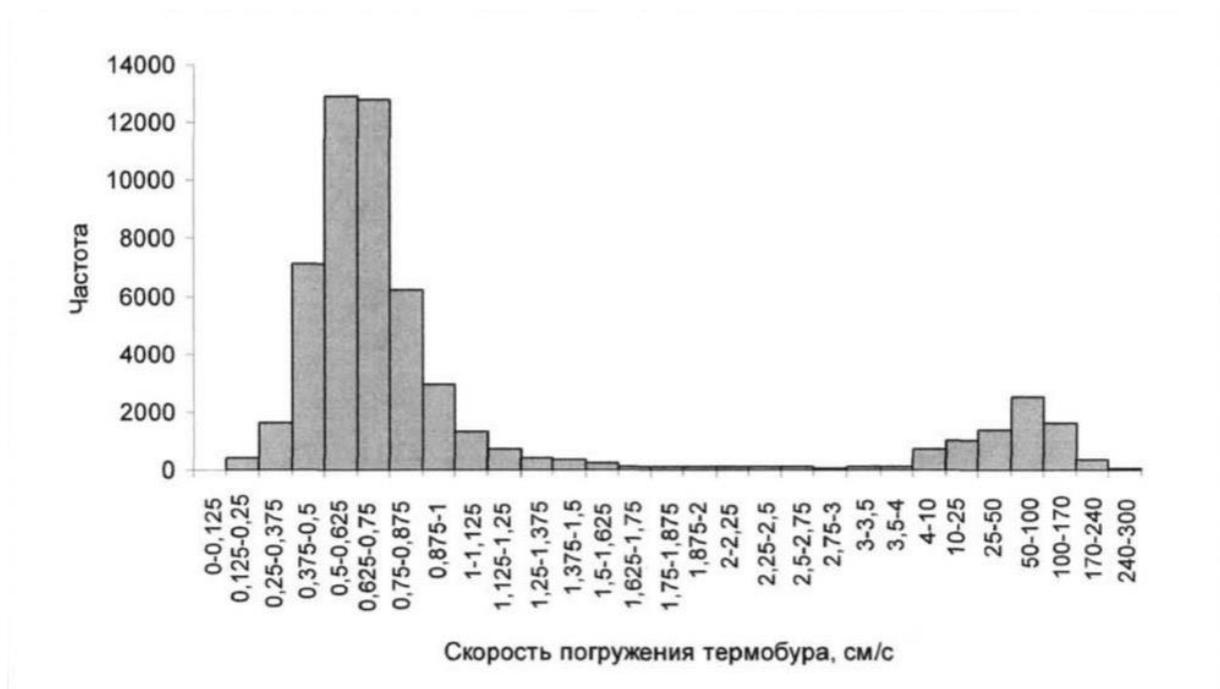


Рис.19 Распределение скоростей погружения электротермобура при бурении торосов Печорского моря в 1999 году

Гистограмма, показывающая распределение двумодальное, выявляет две различные фазы: первая фаза соответствует проникновению бура в лед, вторая же, более длинная и распределенная, отражает его падение через воздушные промежутки и пустоты в ледяных торосах. Из-за того, что гистограмма между

этими фазами показывает минимальные значения с плавно снижающейся кривой, точно установить критическую скорость, при которой бур переходит из ледяной среды в воздушную, становится проблематично. Следовательно, важно учесть минимальные значения скорости в интервале между пиками и исключить все значения, превышающие этот минимум, из дальнейшего анализа. В приведенном анализе, значение 2,54 см/с является определяющим скоростным порогом, поскольку 99% измерений скорости не превышают этот предел. Скорость свыше 2,54 см/с на скоростных записях указывает на наличие полости или выход бура в открытое море, тем самым определяя участки как пустотелые. Следовательно, 2,54 см/с можно считать критическим значением скорости для данного исследования[25].

Применение водяного бурения в сравнении с тепловым методом, где можно легко контролировать скорость погружения бура, представляет собой более сложный процесс. В большинстве случаев при тепловом бурении скорости остаются в пределах определенного узкого диапазона, что составляет около 99%. Однако, как видно из гистограмм на рисунке 20, определение критической скорости перехода бура из льда в пустоту при использовании водяного метода значительно сложнее. В таком случае, другой метод бурения может представлять собой более эффективное решение для этих задач. В моменты, когда бур выходит в открытое пространство, его скорость увеличивается. Однако, эта скорость ограничена длиной бурового шланга и влиянием сопротивления окружающей среды, что не позволяет ей достичь скорости свободного падения. Путём анализа графика скоростей можно выделить те моменты, когда ускорение бура стабильно и значительно превышает заданный порог (в данном примере, более 200 см/с на расстоянии более 3 см), и определить эти моменты как периоды ускоренной работы бура[26] На иллюстрации 21 демонстрируется метод выявления пустот, как указано в критерии. Во время процесса электротермобурения, ускорение работы термобура способствует обнаружению пустот. Определить нижнюю границу пустот можно по заметному снижению скорости бурения.

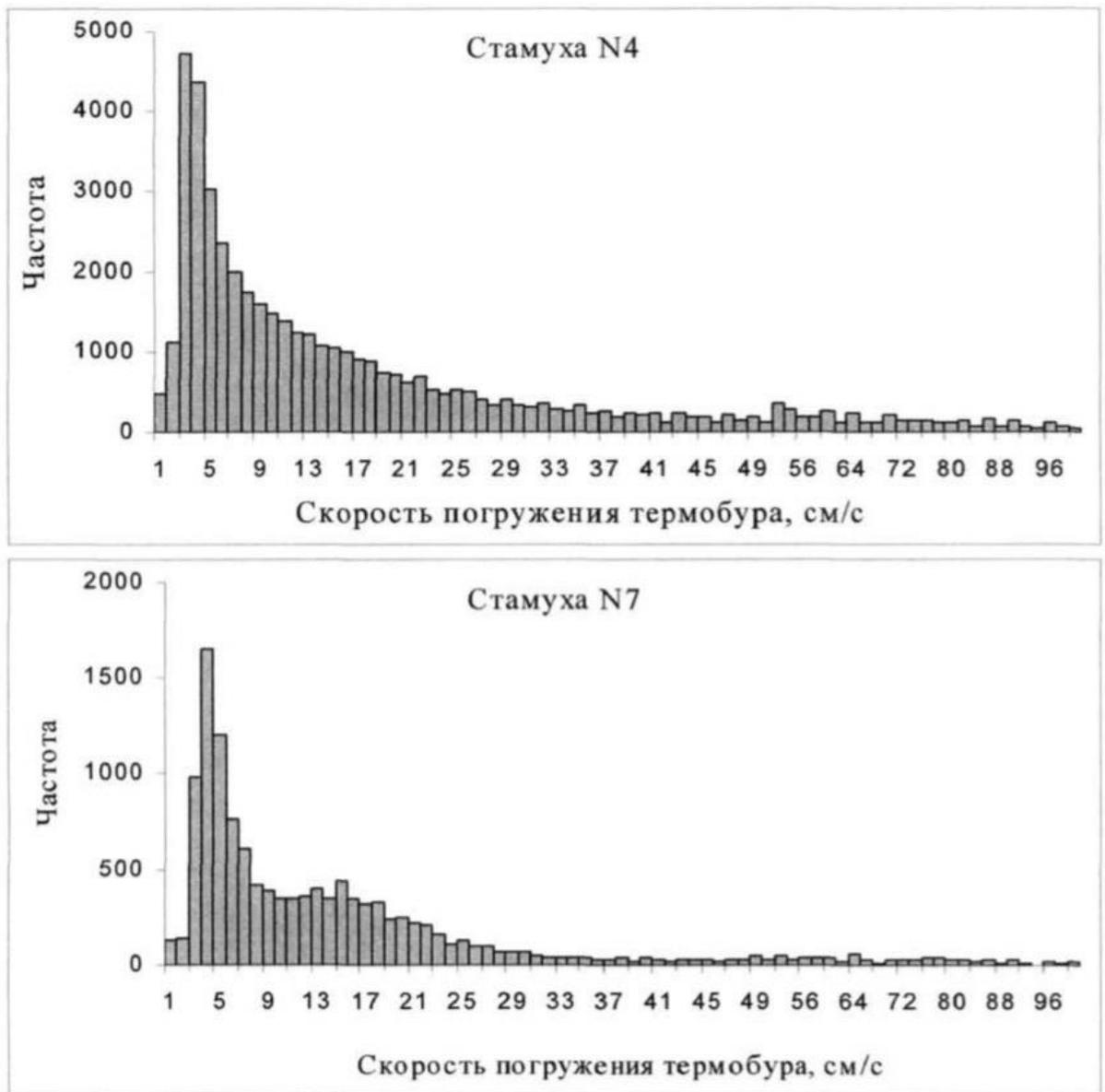
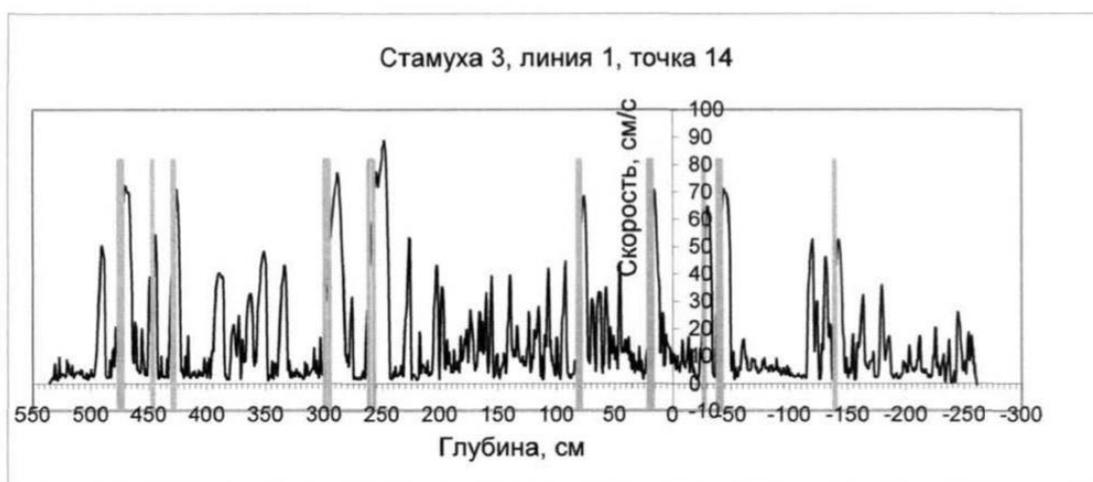


Рис. 20 Распределение скоростей погружения водяного термобура при бурении стамух Каспийского моря в 2001 г.

В 2001 году, в ходе исследований стамух Каспийского моря, были проведены работы по бурению нескольких скважин горячей водой на ровной поверхности льда у основания стамухи, недалеко от места взятия керна. Это было сделано для тестирования их эффективности. В процессе анализировали данные о структуре льда, полученные из описаний керна и записей. Исследовалась также возможность использования данных о скорости бурения для различения участков с разной плотностью льда. На рисунке 22 отображено, что скорость бурения почти идентично совпадает в разных точках, что указывает на то, что колебания скорости напрямую связаны с характеристиками

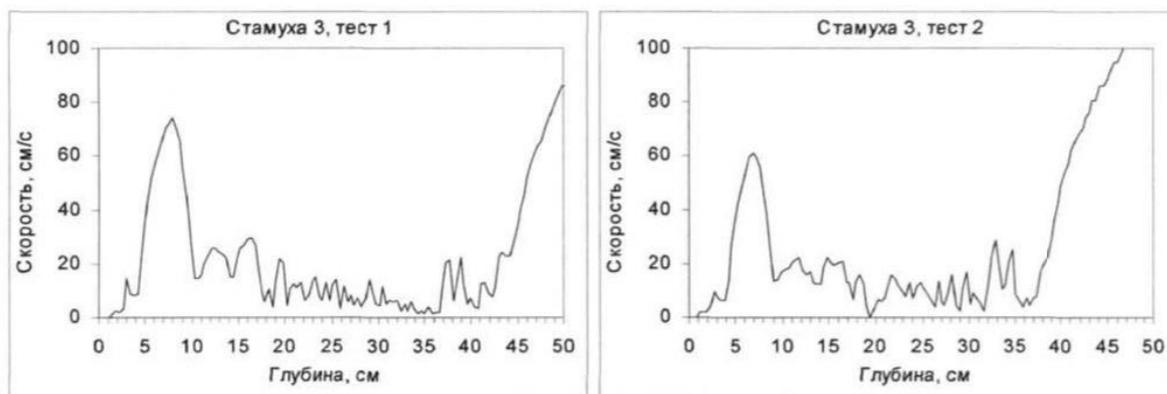
самого льда, а не с внешними помехами или шумом. Анализ керна подтвердил предварительные выводы о структуре льда, сделанные на основе записей.

Вначале обнаруживается слой твердого льда с тонкой коркой на его поверхности, за которым идет рыхлый лед, а затем снова плотный лед. Записи скоростей показывают, что разделы этих слоев совпадают с границами, установленными при анализе керна.



Серым цветом выделены участки постоянного ускорения термобура.

Рис. 21 - Пример выделения пустот на записи скорости.



Запись скорости в двух точках вблизи от места взятия керна.

Рис. 22 - Тестовое бурение ровного льда у подошвы стамухи №3 (Каспийское море, 2002 г.)

В процессе исследования методом термобурения были определены методики для классификации плотных и рыхлых слоев льда на основе анализа полученных данных. Изучение керна позволило идентифицировать два типа льда: плотный и рыхлый, как это демонстрирует Рисунок 23. Для каждого типа

льда были определены статистические параметры, связанные с эффективностью процесса бурения. В результате анализа, который включал разные статистические показатели, был разработан эффективный метод для дифференциации слоев льда. Для разделения зон с различной плотностью льда можно использовать среднюю скорость бурения в сочетании с абсолютным отклонением на данном участке. Как правило, скорости бурения в плотном и рыхлом льде оказываются близкими на границе этих слоев. Так, если рассматривать среднюю скорость бурения и абсолютное отклонение на участке с рыхлым льдом, это может служить основанием для определения момента достижения буром менее плотных слоев. Это предложение позволяет сформулировать критерий, который помог бы четко определить переходы между слоями льда разной плотности.

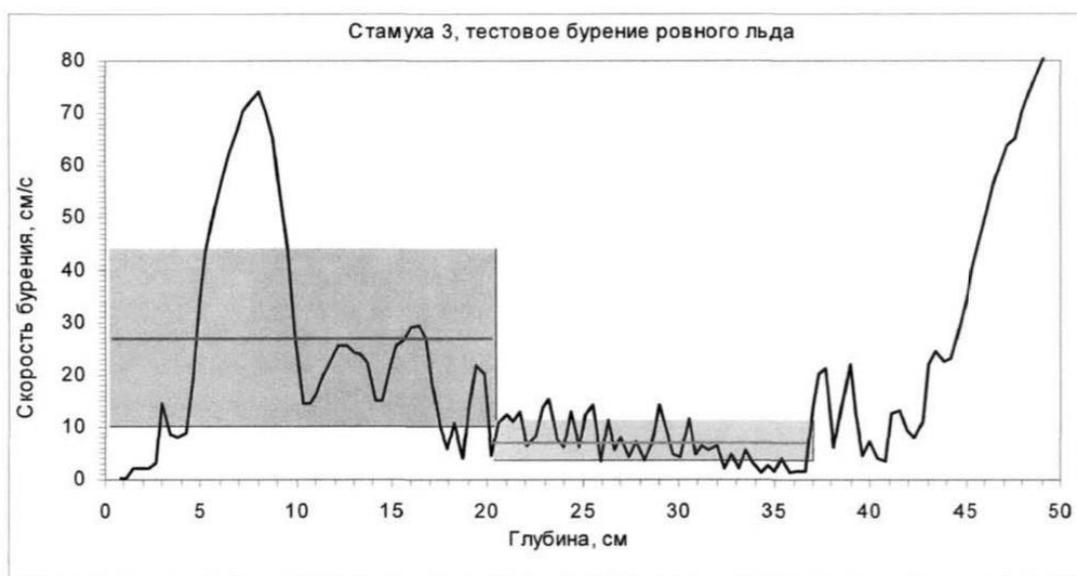


Рис. 23 - Определение критериев выделения участков плотного и рыхлого льда

На графике 23 наглядно изображены линейные графики, отражающие средний темп работы бура на отдельных сегментах. Также присутствуют заштрихованные секторы, которые выделяют колебания данных вокруг среднего значения, учитывая стандартное отклонение.

Исследования показали, что существующий критерий для определения границ между плотным и рыхлым льдом эффективен лишь в ограниченных случаях, как это видно из анализа записей бурения. В связи с этим, ранее

упомянутое ускорение работы термобура следует учитывать, так как текущий метод не позволяет точно выявлять пустоты. На рисунке 22 предполагаемая полость на расстоянии 6 см отсутствует, что подчеркивает недостаточность критерия для идентификации таких пустот. Таким образом, необходимо разработать более универсальный подход к определению структуры льда.

В процессе анализа ледяных участков, исследователи используют стандартизированный метод, который включает в себя бурение с помощью электрического и водяного оборудования для различения плотных и рыхлых структур льда. В процессе бурения проводится анализ образцов льда, что позволяет специалистам оценивать различия в скорости бурения по разным зонам. Исследования показали, что скорости бурения на участках с плотным и рыхлым льдом обычно следуют нормальному распределению, что подтверждается графиками в разделе 24 (а,б) и демонстрируется в двух разных наборах данных.

Для определения типа льда — рыхлого или плотного — можно прибегнуть к следующей методике. Когда скорость работы термобура превосходит заранее определённый уровень в зонах, ранее идентифицированных как ледяные, эти места можно классифицировать как рыхлый лед. Наоборот, если термобур функционирует медленнее нормы, это свидетельствует о наличии плотного льда. Это может сигнализировать о том, что бур перемещается из плотного льда в область с большей пористостью или из твердого льда в мягкий. Существует граничная скорость, которая разделяет эти два типа льда — скорость плотного и рыхлого льда.

Для визуального анализа граничной скорости бурения, необходимо сравнить процентное распределение скоростей для различных типов льда. Это означает, что в заданном диапазоне скоростей, область под кривой, показывающей скорости бурения в плотном льде, должна соответствовать области под кривой для рыхлого льда (см. рис. 24(В)). Такое сравнение требует точного подсчета процентов по каждому распределению.

В приведенном примере, скорость бурения льда с высоким (95%) и низким (5%) уровнями влаги обе приводят к одинаковой скорости в 0,55 см/с, которая

устанавливается как предельная. Значение уровня значимости для этого критерия составляет 0,05.

Для наглядности рассмотрим результаты исследований: в 1999 году скорость электротеплового бурения плотного льда в Печорском море достигла 0,55 см/с, в то время как в 2001 году скорость водяного бурения льда в Каспийском море была значительно выше и составила 6 см/с.

Критерии плотности льда, установленные на уровне 0,5 см/с и 6 мм/с, основываются на данных, полученных в определенных условиях. Однако эти значения могут изменяться в зависимости от различных факторов, таких как экстремальные температуры или географическое положение региона, особенно если он приближен к зоне замерзания. Также результаты могут варьироваться в зависимости от времени года, когда проводится бурение, и от температурных условий воды, будь они выше или ниже обычных.

Для идентификации участков, где бур проходит через плотный лед, можно применить альтернативный метод. Этот метод предполагает анализ диаграммы скорости бурения, выделение зон с равномерным погружением бура, и последующее определение их средней скорости и дисперсии.

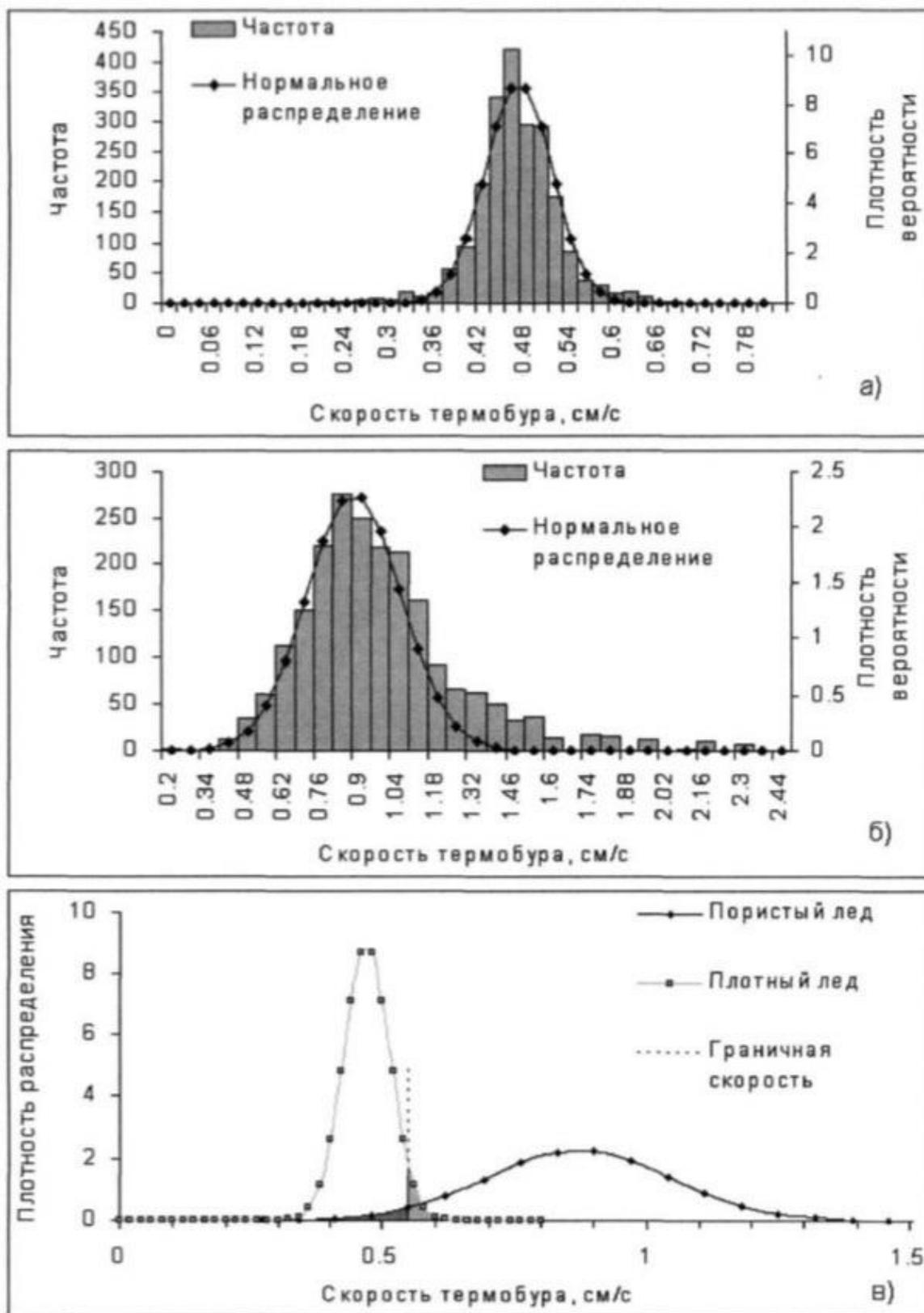


Рис. 24 - Гистограммы скоростей бурения плотного (а) и рыхлого (б) льда торосов Печорского моря (1999 г.), аппроксимированные нормальным законом распределения (в)

Используя значимые критерии для анализа данных нормальной совокупности, можно с определенной вероятностью судить о принадлежности

выборки к скоростям бурения в плотном льде, как показано на рисунке 24 (а). В альтернативной формулировке, это также может указывать на то, что скорость течения воды в конкретном месте соответствует скорости бурения в плотном льде. По результатам, полученным с использованием термобура в рамках Печорской экспедиции 1999 года, примерно 4% от всего исследованного льда составили участки плотного льда, выделенные этим методом. На рисунке 24 (а) виден массив скоростей, который включает зоны из плотного и консолидированного льда. Это позволяет предположить, что используемый метод эффективен для выявления и оценки средней толщины отдельных консолидированных участков льда.

Важно отметить, что в процессе классификации ледяных образований, известных как торосы или стамухи, стоит рассматривать не две, а три различные категории: твердый, мягкий и еще один тип, который можно выявить по данным из гистограммы скоростей тестового бурения (см. рис. 25). В этих исследованиях, значительно опирающихся на зарубежный опыт и традиции прошлого, особенно при использовании механического и водяного бурения, обнаруживается три пика, что существенно корректирует представления о структуре льда. Таким образом, традиционное деление льда на плотный и мягкий виды требует пересмотра и дополнения за счет введения третьей категории, что отражает большую детализацию и точность в изучении ледяных образований.

Анализируя гистограмму и соответствующий график скорости (см. рис. 22, тест 1), можно заметить, что на участках с плотным льдом выделяются две точки, где скорость бура остаётся стабильной и выше по сравнению с другими участками. Эти точки совпадают с локальными максимумами средних значений скорости, указанными на гистограмме.

В настоящее время анализ данных о скорости бурения льда часто включает в себя не только изучение равномерного льда с высокой пористостью, но и изучение зон с мелкими фрагментами льда, а также участков с тонкими слоями льда толщиной менее 5 см, иногда даже шуги. Очевидно, что более точным подходом будет классификация различных типов льда, таких как торос или

стамуха, на разные категории, как указано в таблице 6, что позволит более точно оценивать данные.

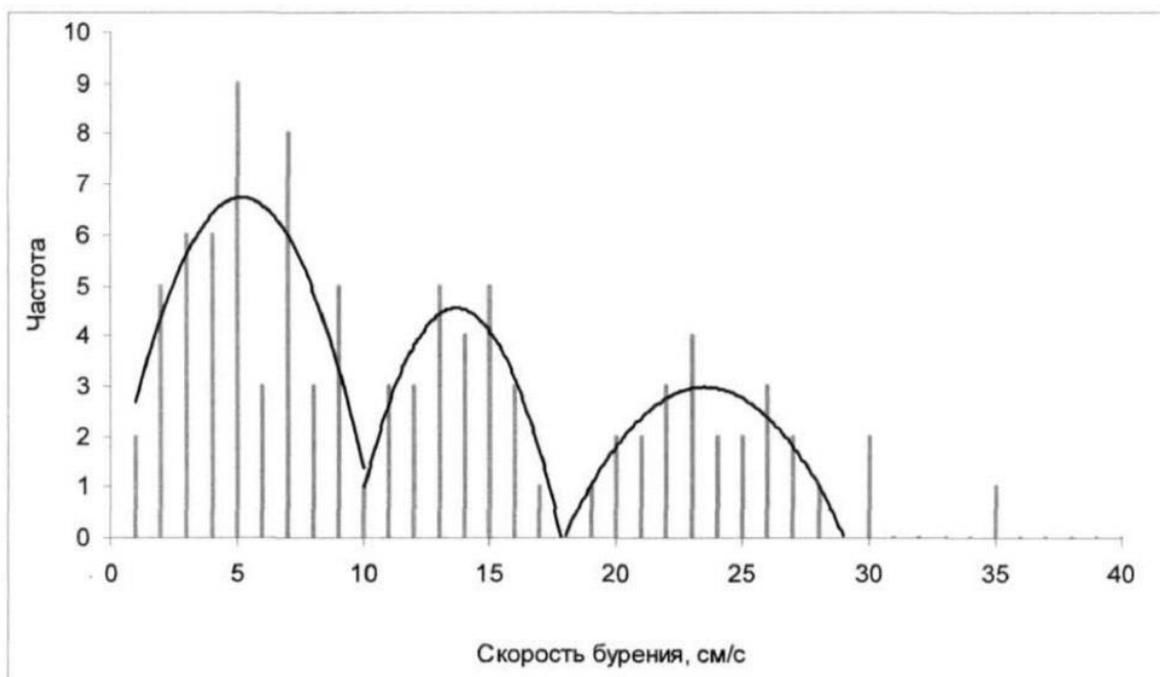
Для того чтобы улучшить методику определения границ пустот и различных типов льда, как плотного, так и рыхлого, важно не только увеличить количество тестовых бурений образцов льда, взятых из природных условий на месте исследований, но и провести детальный сравнительный анализ данных, полученных в результате бурения тороса или стамухи, с данными, полученными из изучения кернов, взятых непосредственно из буровых скважин.

В будущем, ключевой целью станет создание стандартов, которые позволят определять разделы ледяных покровов по скорости их проникновения термобуром, ориентируясь на новые классификации фракций тороса и стамухи.

Таблица 6

Фракции тороса или стамухи

В настоящее время:	Предлагается:
Плотный (твердый) лед	Плотный (твердый) лед
Рыхлый (мягкий) лед	Рыхлый
	Отдельные мелкие куски льда или наслоенный тонкий (менее 5 см) лед
	Шуга
Пустоты	Пустоты



Непрерывной линией обозначена сглаженная огибающая.

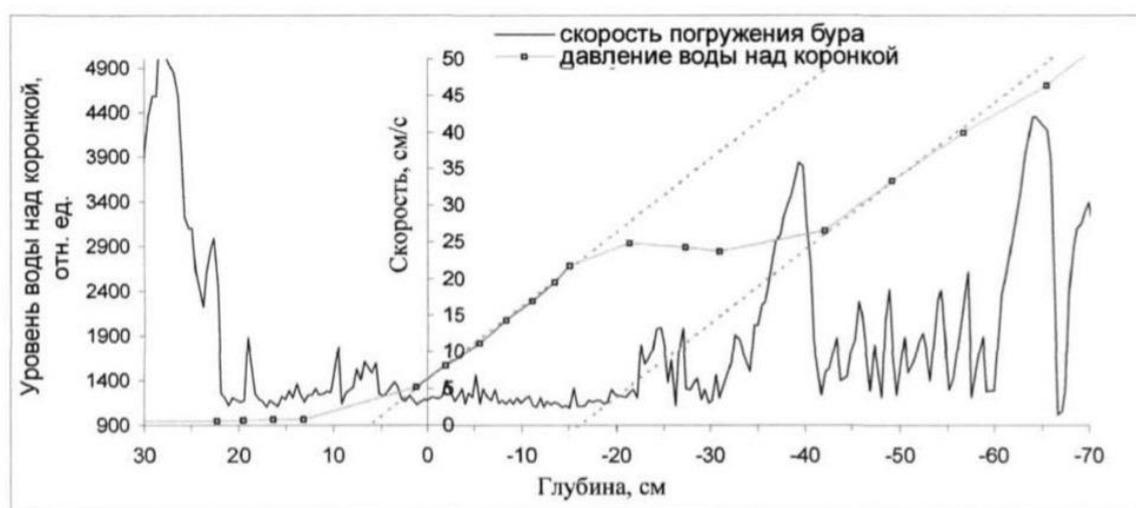
2.4 Методика определения границ консолидированного слоя

Во время термического бурения-плавления в скважинах, проникающих в замерзший лед, часто встречается талая вода, благодаря наличию водонепроницаемого льда в консолидированных участках. Измерения скважин и скорость бурения позволяют выявлять определенные участки, уровень воды в которых остается стабильным. Это происходит из-за того, что пористый замороженный лед, в который проникает бур, находится в связи с морской водой, и уровень воды в скважине соответствует уровню моря. Обычно вода поступает в эти скважины, стекая по поверхности льда. Изучение изменений уровня воды в водоеме помогает уточнить, где заканчивается консолидированный водонепроницаемый лед и начинается пористый лед, что также влияет на скорость бурения. Когда скважина достигает пористого льда и верхняя граница консолидированного слоя находится выше морского уровня, происходит снижение давления и уровня воды в скважине. Для определения нижней границы ледяного слоя, особенно когда она расположена на уровне моря или ниже, используются данные о скорости погружения бура. Это позволяет делить структуру льда на плотный и рыхлый. Информация о границах уплотненного льда представлена на рисунке 26. В процессе бурения для измерения уровня воды применяется датчик давления, который закреплен на термобуре на расстоянии 16,7 см от буровой коронки. На диаграмме отображены колебания давления, указанные серым цветом и маркированы точками. При достижении термобуром уплотненного слоя, на датчике фиксируется возрастание давления воды, что визуализировано на графике первой пунктирной линией.

Когда бур углубляется, на графике видно, что вторая пунктирная линия показывает рост давления воды, которое соответствует увеличивающейся глубине проникновения. В начальной фазе, когда бур пробивает уплотненный слой и вода начинает просачиваться из моря в скважину, уровень воды в

скважине выравнивается с уровнем моря. На графике, на первой пунктирной линии, видно, что нижняя граница этого консолидированного слоя находится на отметке -22 см, в то время как верхняя граница находится на 22 см. Анализируя скорость погружения бура и изменения давления, можно определить границы уплотненного слоя. Ускорение процесса бурения свидетельствует о том, что лед имеет рыхлую структуру.

Во время экспедиционных исследований в 2002 году в Каспийском море, изучение различных аспектов предложенного метода оказалось ограниченным. Это связано с тем, что процесс проведения исследований совпал с периодом активного таяния ледников и стамух, которые находились в фазе распада. Специфические условия в районе исследований показали, что стамухи разрушаются из-за таяния и последующего оседания, что подтверждалось визуальными наблюдениями и данными, полученными после термобурения.



Пунктирными линиями обозначен ход нарастания давления воды над коронкой

Рис. 26- Пример определения границ консолидированного слоя по записи скорости бурения и давления воды над коронкой (фрагмент записи)

На рис. 27 приведен фрагмент стамухи, на котором отчетливо просматривается консолидированный слой заметно ниже уровня моря.

В ходе анализа данных термобурения, проведенного в Каспийском море в 2003-2004 годах и в Арктическом бассейне с 2004 по 2006 годы, осуществлялось определение границ укрепленных слоев, что отражено на Рисунке 27. Этот

рисунок иллюстрирует изменения давления воды над буровой установкой, указывая на присутствие стабильного слоя в структуре ледяного покрова. В некоторых районах бурового профиля, расположенных у края ледяного поля и близки к уровню воды, зафиксировано наличие непроницаемого слоя вблизи водной границы. Это обнаружение было сделано при помощи измерения давления воды над буровой установкой. Скорость бурения на этом слое напоминает скорость прохождения через ровный слой льда.

В некоторых сегментах бурения, приближаясь к поверхностному слою льда и, особенно у краев, где уровень воды остается стабильным, обнаруживался непроницаемый слой. Документация показывает, что давление воды над этим слоем подтверждает его присутствие возле водной отметки. Скорость бурения на этом участке схожа с прохождением через ровный лед.

Наличие твердого ледяного слоя, который равномерно покрывает верхнюю и нижнюю части фрагментированного льда, подтверждает стабильность ледяного покрова на границах торосов или стамух (рис. 28).

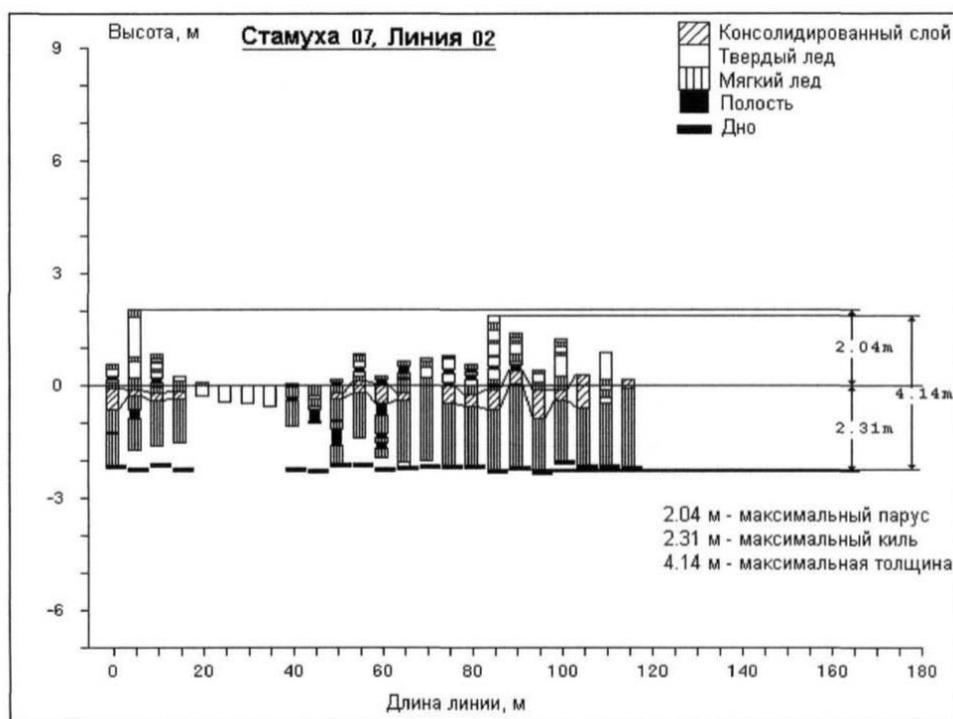


Рис. 26 - Фрагмент стамухи

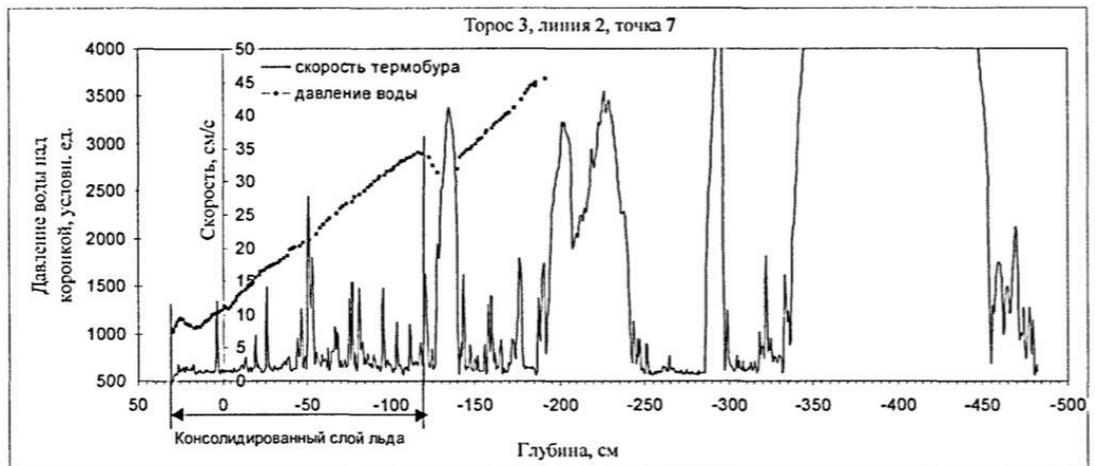


Рис. 27- Определение границ консолидированного слоя по записи скорости бурения и давления воды над коронкой

Описываемый метод определения верхних границ скоординированного слоя применим только тогда, когда эти границы находятся над уровнем моря.

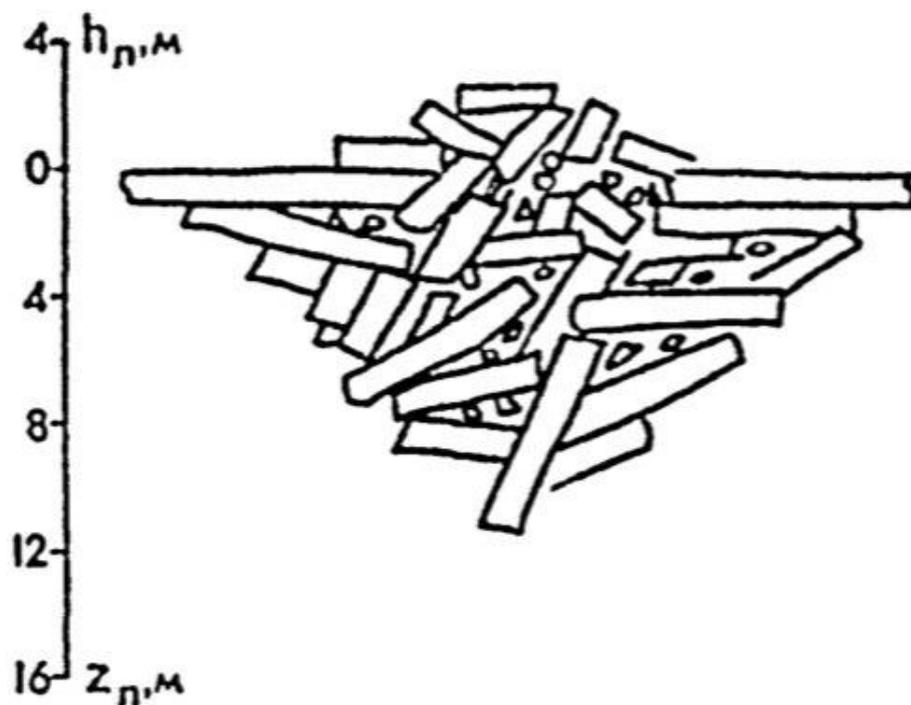


Рис. 28- Схема поперечного сечения свежей гряды торосов [Грищенко, 1988].

2.5 Выводы по главе 2

Во 2-ой главе проанализированы технические методы термобурения. Выделены плюсы использования термобура, рассмотрены некоторые характеристики термобуровых установок.

Изучены электротермобуровые установки и термобуровые установки, работающие с применением горячей воды. Приведены их схемы, основные технические характеристики и отличия.

Проанализирована методика определения участков плотного и рыхлого льда, границ пустот. Рассмотрено определение критериев выделения участков плотного и рыхлого льда. Проведено сравнение скорости бурения для участков плотного и рыхлого льда.

Рассмотрена методика определения границ консолидированного слоя. Изучены примеры определения границ консолидированного слоя.

Глава 3. Результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух в различных регионах.

3.1 Торосы Печорского моря

В 1999 году на Печорском море началось уникальное электротепловое бурение льдов. Исследования проводились на 13 торосах, где было зафиксировано 78 скоростей бурения. Средняя толщина льда в этот период колебалась от 66 до 74 см, с минимальной толщиной в 20 см и максимальной в 140 см. Стандартное отклонение толщины льда составило 18,8. Для обеспечения постоянного бурения, нагревательные элементы регулярно снабжались электроэнергией. Как показано на рис. 29, была разработана методика, позволяющая определять границы участков с различной плотностью льда вдоль скважин. Это включало участки с плотным и рыхлым льдом, а также пустоты. Основные параметры торосов представлены в таблице 7.

Таблица 7

Статистические характеристики исследованных торосов

	Парус	Киль	Общая толщина льда
Максимум, см	398	1137	1376
Минимум, см	-21*	208	218
Среднее, см	108	609	717

*Верхняя поверхность льда находилась ниже уровня моря на 21 см

На рисунке 30 показано, как разнообразные формы тороса, включая плотный лед, рыхлый лед и воздушные пустоты, распределяются с изменением глубины. Эта информация была получена в результате анализа 78 случаев.

Исследование показывает, что плотность льда у поверхности воды и под ней возрастает в районах с консолидированным льдом. Однако, в центральной части кили преобладает менее плотный лед с большим количеством воздушных

пустот, что представляет собой противоположную тенденцию.

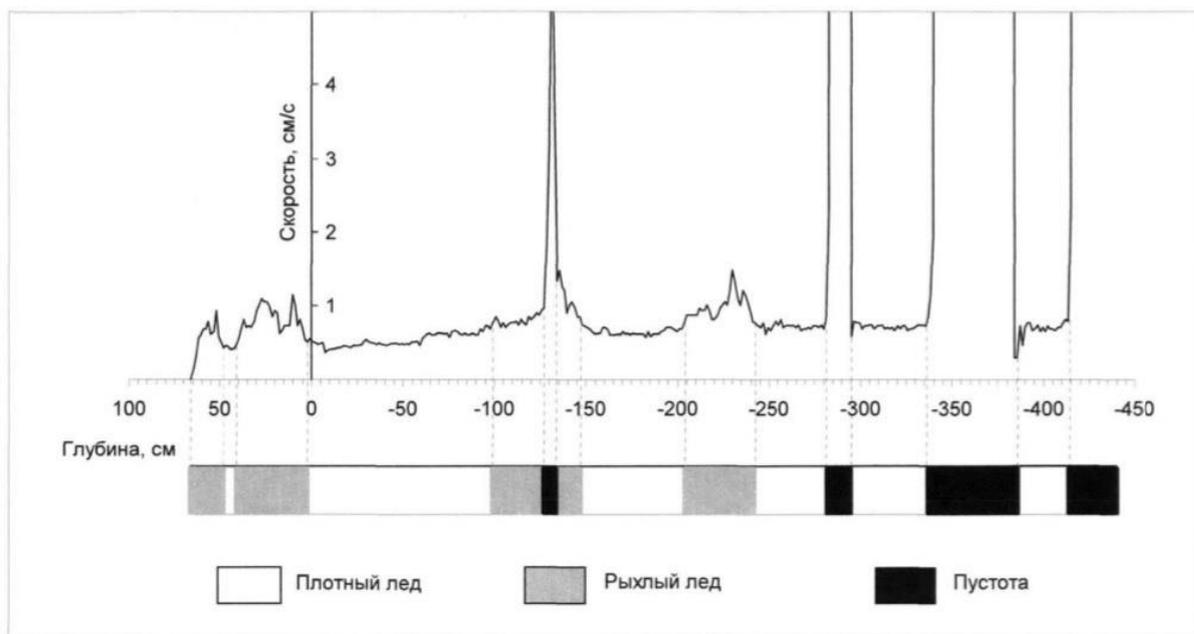


Рисунок 29 - Схема распределения льда вдоль скважины

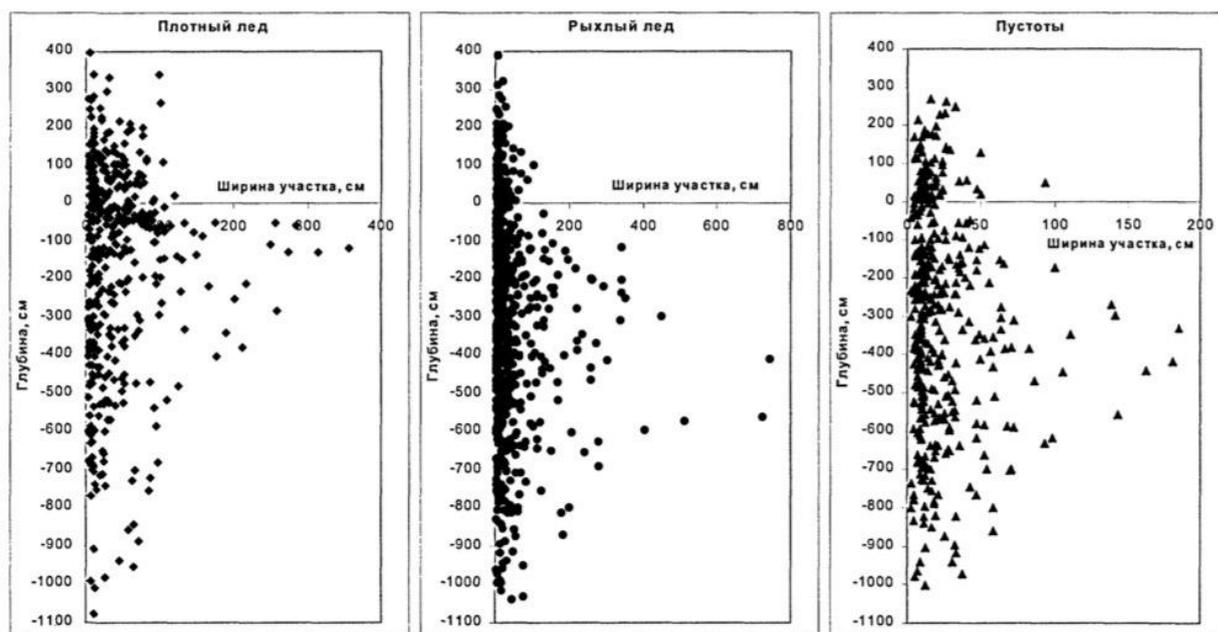


Рис. 30 - Диаграммы распределения фракций однолетнего тороса по глубине (по данным электротермобурения торосов Печорского моря в 1999 году).

Чтобы установить объемные характеристики и плотность тороса за один год, рекомендуется собрать информацию по рыхлым и плотным сегментам льда, включая пустоты, из всех доступных источников. После агрегации этих данных их следует анализировать в контексте общего числа выполненных бурений за указанный период, как показано на рисунке 31.

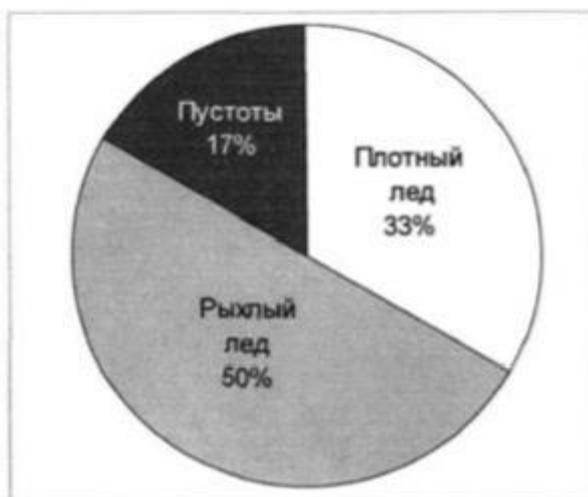


Рис. 31 – Соотношение плотного льда, рыхлого льда и пустот для среднестатистического однолетнего тороса (по данным электротермобурения торосов Печорского моря в 1999 году).

В ходе анализа данных, полученных во время изучения торосов и стамух на шельфе острова Сахалин и в Печорском море, обнаружилась проблема с оценками толщины консолидированного слоя. Оценка, производимая на основе скорости термобурения и субъективных впечатлений оператора, часто оказывалась преувеличенной. Ошибочное определение границы этого слоя происходило из-за метода, который учитывал первый же провал термобура ниже уровня воды. Эти неверные данные могли показывать толщину слоя в пределах 600-800 см, как это видно из иллюстрации на рис. 31, подчеркивающим такие искажения.

Исследования показали, что размеры изучаемых торосов составляют примерно половину от размеров торосов на шельфе Сахалина, зафиксированных в 1998 году. Кроме того, было установлено, что толщина торосового слоя в Печорском море, равная 245 см, представляет собой лишь треть от обычной толщины тороса, что может вызывать вопросы относительно его стандартных размеров.

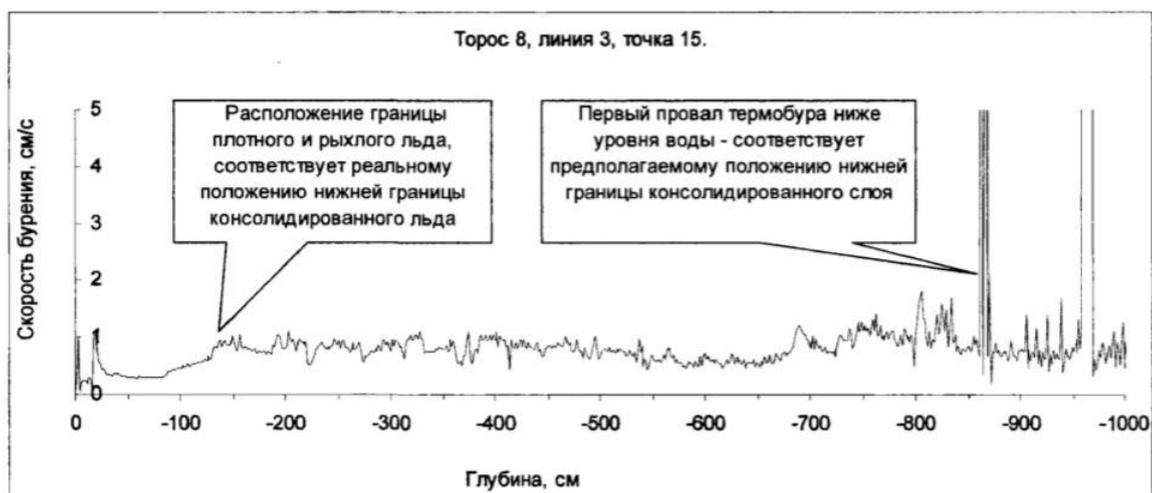


Рис. 31- фрагмент записи скорости бурения тороса, иллюстрирующий возникновение методической ошибки в определении границ консолидированного слоя

3.2 Торосы Арктического региона

В 1969 и 1970 годах, во время летних экспедиций на дрейфующих льдинах «СП-18» и частично на «СП-19», были проведены исследования морфологии арктического льда. Исследователи обнаружили, что в процессе торшения многолетнего льда в его нижней части формируются крупные фрагменты. Эти фрагменты, имея относительно небольшие размеры, способствуют образованию нижней части тороса и часто всплывают к поверхности, создавая выступы на льду.

Исследования морфометрики торосов проводились на дрейфующей станции «СП-32», где были изучены особенности структур молодого и многолетнего льда. В результате выявлено, что торосы из многолетнего льда характеризуются наличием неопределенной формы фрагментов, напоминающих кубы и сферы. В то время как в торосах из свежесформированного льда преобладали более упорядоченные формы в виде пластин и стержней. Было замечено, что размеры обломков в подводной части торосов, сформированных из свежего льда, значительно превышают размеры обломков в их надводной части. На дрейфующей станции «СП-22» были проведены исследования, результаты которых показали, что объем льда, вытесняемый при формировании торосов, имеет коэффициент заполнения 0,48, при условии, что толщина льда

составляет 20 см. Кроме того, было выявлено, что соотношение между высотой торосов над водой и количеством осадков, оседающих на их поверхность, варьируется между 4,8 и 5,5.

В 2004 году, сентябрь отметился высадкой дрейфующей станции «Северный полюс-33» с «Академика Федорова». Исследователи, присутствующие на станции в момент её высадки, проводили анализ ледяного покрова в пределах 350 километров. Особое внимание уделялось электротепловому бурению торосов, в ходе которого было выполнено 49 измерений скоростей бурения в трех разных местах. Электричество бесперебойно подавалось на нагреватель, что позволило продолжить бурение без остановок. Исследования также не прекратились в последующем году, охватив сезон полевых работ 2005 года.

Исследователи, работающие в самом сердце Северного Ледовитого океана, выявили значительные различия в динамике бурения ледяных торосов в разные времена года: апрель и сентябрь. Особенно примечательны результаты сентября 2004 года, когда наблюдалось резкое увеличение скорости бурения на второй и третьей фазах тороса, по мере продвижения термобура вглубь. Такие изменения скорости, зафиксированные ранее только при работах на однолетних льдах Охотского и Печорского морей, подчеркивают уникальность и важность данного открытия в контексте изучения арктических льдов.

В апреле 2005 года в одной локации были замечены колебания в скорости бурения, как показано на рисунке 32(б). По результатам исследований выяснилось, что под уплотнённым слоем льда находится киль тороса, характеризующийся наличием многочисленных больших пор и каверн. Это явление было связано с периодом завершения летнего таяния, когда под ледовый покров проникает значительное количество воды. Введение холодной пресной воды под лед способствует его таянию, особенно в области кия тороса, что и было замечено в ходе бурения в указанный период времени. В ходе зимы происходит замерзание множества пор и каверн, что способствует

более стабильной работе термобура при его погружении.

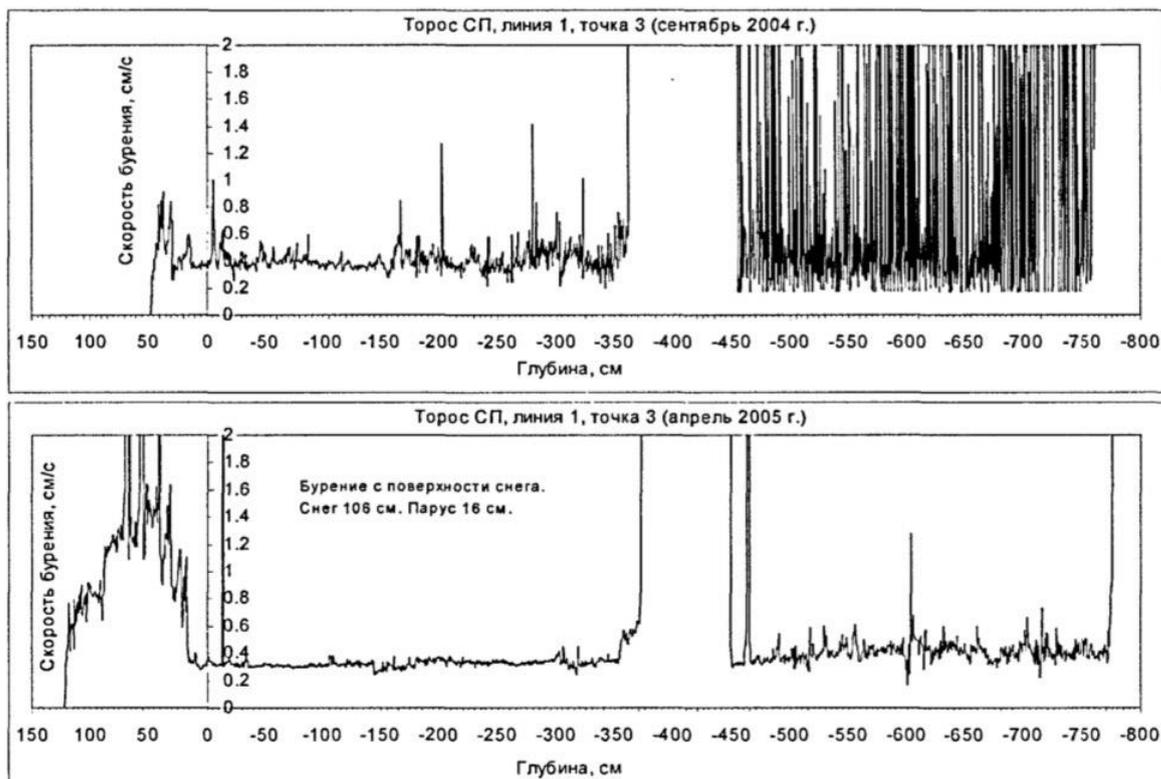


Рис. 32- Пример записи скорости термобурения тороса Арктического бассейна

Исследование различных торосов показало, что их особенностью является наличие значительных пустот в их структуре. В частности, в одной из скважин тороса №3 обнаружены три участка, где длина пустот превышает 200 см, причем одна из них достигает 327 см. В отличие от этого, пустоты, найденные в однолетних торосах в предыдущих исследованиях, были значительно меньше. Например, максимальная длина пустот в торосах, бурившихся в 1998 году в Охотском море и в 1999 году в Печорском море, не превышала 185 см. Тем не менее, в Баренцевом море в 2002 году была замечена полость в киле однолетнего тороса с вертикальным размером более 400 см.

На рис.33 представлены графики, основанные на термобурении сентября 2004 года, показывающие результаты работы на торосах. Все три графика имеют одинаковый масштаб по вертикальной оси. Отличительной особенностью является то, что при бурении первого тороса применялся метод определения границ консолидированного слоя через измерение давления воды над коронкой, что позволило выделить этот слой на графике 33 (а) в отдельный

цвет. В процессе бурения второго и третьего торосов такие измерения не проводились.

Таблица 8 содержит основные морфометрические характеристики исследованных торосов.

Исследование показало, что три анализируемых тороса, расположенных на двухлетнем ледяном покрове, обладают схожим коэффициентом заполнения, как указано на рисунке 34. В данных торосах первый оказался самым молодым, в отличие от второго и третьего. Причем, соотношение средней высоты паруса к средней глубине киля у первого тороса составило примерно $1/4$, тогда как у остальных двух торосов это значение было около $1/10$. Во время летнего сезона, когда таяние воды создает пористую структуру ледяного киля торосов, лед приобретает похожие характеристики на решето. Наблюдения показывают, что в стамухах лед теряет свою плотность быстрее из-за сильных приливных течений. Эти течения способствуют ускоренному разрушению льда в статичных областях, где киль льда быстро повреждается. В ходе изучения многолетних торосов на дне некоторых килей были выявлены участки льда, получившие обозначения как «мягкие» и «влажные зоны», где содержание льда колеблется между 17 и 22 процентами[27].

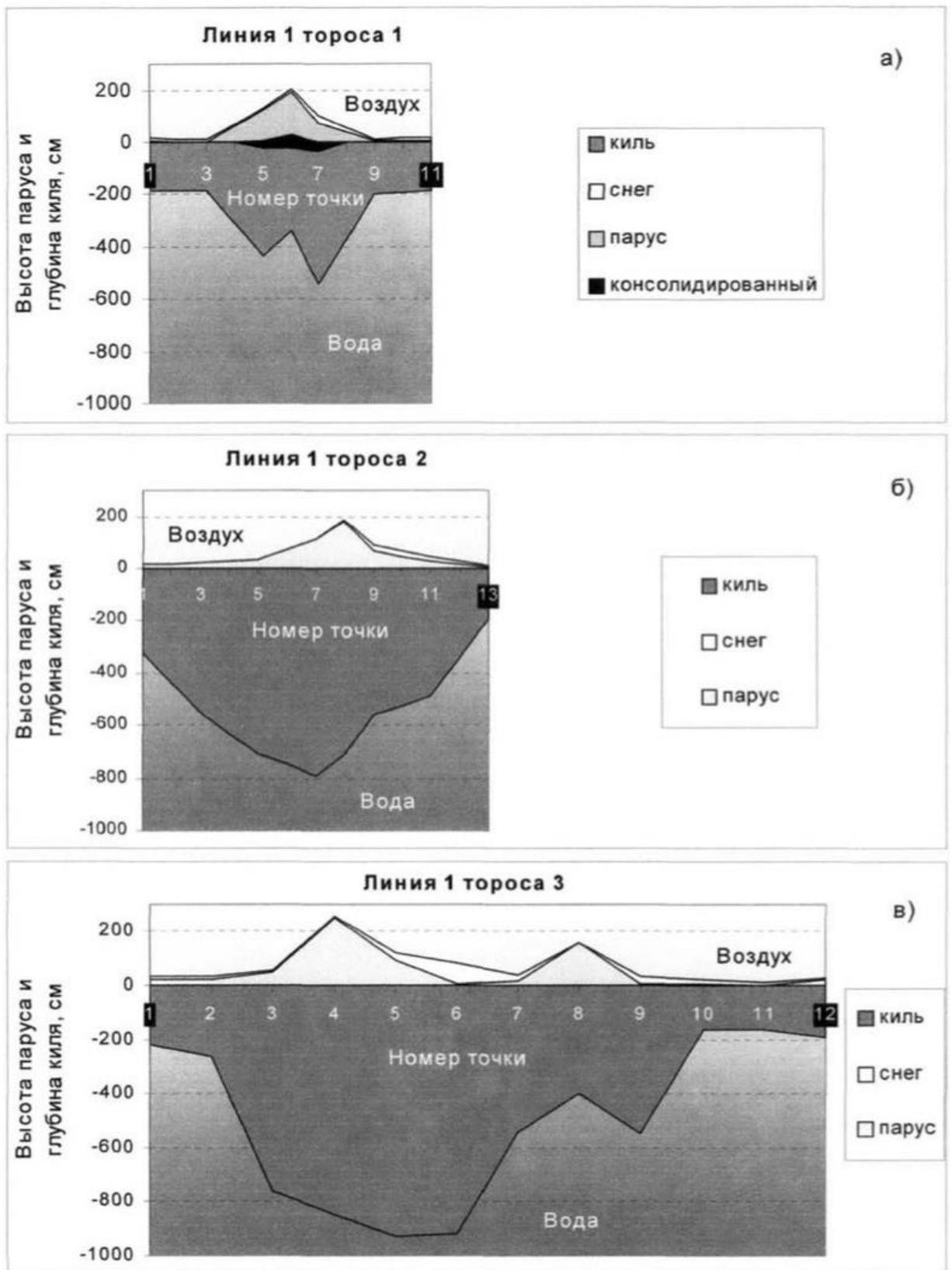


Рис. 33- Профили сечения торосов Арктического бассейна, построенные по данным термобурирования в 2004 г.

Морфометрические характеристики исследованных торосов Арктического бассейна (по данным термобурения в 2004 году).

	Торос 1	Торос 2	Торос 3
Координаты тороса	85°05,8'N; 174°05,0'W	85°06,2'N; 175°44,4'E	85°06,7'N; 155°28,5'E
Количество пробуренных скважин	14	14	40
из них с записью скорости бурения на РС	6	4	39
Максимальная толщина льда, см	620	942	1099
Средняя толщина льда, см	525	632	555
Максимальная высота паруса, см	195	180	251
Средняя высота паруса, см	143	59	57
Максимальная глубина киля, см	544	881	930
Средняя глубина киля, см	382	595	498
Среднее значение верхней границы консолидированного слоя (по записи давления воды над коронкой), см	11	-	-
Среднее значение нижней границы консолидированного слоя (по записи давления воды над коронкой), см	-26	-	-
Средняя толщина консолидированного слоя (по записи давления воды над коронкой), см	38	-	-
Максимальная толщина ровного льда вблизи тороса, см	286	201	290
Минимальная толщина ровного льда вблизи тороса, см	187	195	166
Средняя толщина ровного льда вблизи тороса, см	215	198	227
Средний коэффициент заполнения тороса	0,88	0,86	0,87
Средний коэффициент заполнения паруса тороса	0,88	0,99	0,99
Средний коэффициент заполнения киля тороса	0,88	0,84	0,85
Соотношение плотного, рыхлого льда и пустот, %	60/28/12	59/27/14	62/25/13
Соотношение плотного, рыхлого льда и пустот в парусе, %	29/59/12	51/48/1	62/37/1
Соотношение плотного, рыхлого льда и пустот в киле, %	71/17/12	60/24/16	62/23/15
Максимальная длина участков плотного льда, см	246	285	490
Средняя длина участков плотного льда, см	37	68	58
Максимальная длина участков рыхлого льда, см	103	321	193
Средняя длина участков рыхлого	15	31	21

льда, см			
Максимальный вертикальный размер пустот, см	60	137	327
Средний вертикальный размер пустот, см	14	65	57

Летом, в период таяния, происходит разрушение некоторых ледяных блоков, составляющих парус тороса. Это способствует увеличению коэффициента заполнения. В результате, парус торосов №22 и №3 оказывается практически полностью заполненным, в то время как парус тороса №1 отличается наличием большего количества пустот. Таяние льда на киле тороса влияет на его устойчивость, так как уменьшает его плавучесть и заставляет его опускаться под собственным весом. В частности, объем паруса торосов №22 и №3 около 2,5 раза меньше, чем у тороса №1. Это подтверждает значимость летнего таяния для структуры и объема парусов торосов. Соотношение киль-парус различается между торосами: у первого оно составляет 2,4, у второго - 4,7, а у третьего - 5,6, что демонстрирует разные степени таяния и влияние на их структуру.

В Таблице 9 представлены статистические данные о торосах из Арктической области. Исходя из информации, представленной в таблице, торос №1 состоит из более мелких фрагментов льда в сравнении с торосами №2 и №3.



Рис. 34- Соотношение плотного, рыхлого льда и пустот в исследованных торосах (сентябрь 2004 г.)

Вероятностные характеристики заполнения торосов

	Торос 1	Торос 2	Торос 3
l , см	52	116	72
h , см	37	68	58
λ , см ⁻²	0,0162	0,0087	0,0106

Исследование показало, что толщина консолидированного слоя тороса №1 оказалась меньше предполагаемой. Это может быть обусловлено специфическими условиями его формирования и возможным отсутствием воздействия экстремально низких температур. Несмотря на то, что исходный лед тороса был относительно толстым, его консолидированный слой не достиг такой же толщины, как и лед в его окружении. Такие выводы требуют подтверждения через дополнительные эксперименты.

Анализ глубинных профилей показал, что на водной границе присутствует узкий слой плотного льда, вероятно, образовавшийся из замерзших снежиц. В процессе углубления, лед становится менее пористым, образуя ровный слой. Исследование сравнения данных с килевыми точками позволило установить, что в сентябре 2004 года на торосе №3 толщина консолидированного льда достигла 300 см. В то время как на торосе №2, из-за ограниченного количества данных, точно определить консолидированность слоя не удалось.

В апреле 2005 года было выполнено изучение распределения температур на вертикальном разрезе тороса №3. На иллюстрации 4.3.4 представлено горизонтальное распределение температуры в определенной зоне бурения. Выводы из исследования утверждают, что на уровне 350 см возникает гомотермическая зона, в которой температура остается неизменной и не реагирует на внешние температурные колебания. Это указывает на то, что граница уплотненного слоя находится именно на этой глубине. Кроме того, на уровне 1 см обнаружена верхняя граница этого слоя, определенная по данным о скорости.

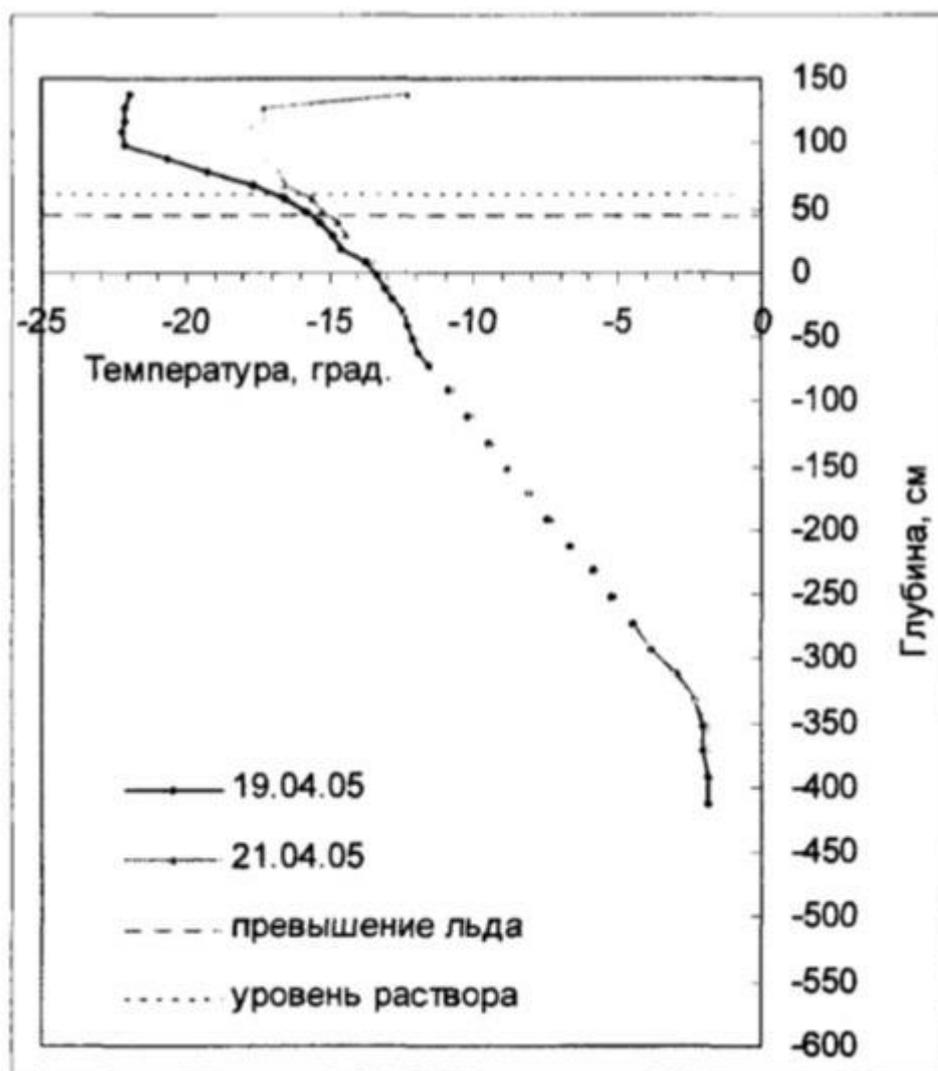


Рис. 35- Вертикальное распределение температуры в одной из точек бурения тороса №3 (сентябрь 2004 г.)

3.3 Торосы и стамухи шельфа о. Сахалин

Весной 1998 года, с марта по апрель, на северо-восточной стороне Сахалина, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт проводил исследования ледяных образований, таких как торосы и стамухи. Эта работа была направлена на получение данных о геометрических характеристиках льдов, что было важно для проектирования подводных трубопроводов и строительства ледостойких морских платформ, в том числе их оснований. Используя оборудование, включая термобур от ААНИИ и водяной термобур от компании Polar Alpine, Inc., были получены морфометрические данные о торосах. В ходе работ термобуром ААНИИ было выполнено 89

измерений скорости бурения в 14 торосах и 18 измерений в двух стамухах. Для измерения толщины и глубины кия тороса используются два термобура, результаты измерений которых схожи, как показывает высокий коэффициент корреляции в 0,94. Движение льда в сезоне 1997/1998 годов происходило согласно средним многолетним условиям. Уровень ровного дрейфующего льда составил 98 см.

Используя методы электротермобурения и водяного термобура, исследователи обнаружили разнообразие в структурных характеристиках ледяных образований. Анализ показал, что толщина льда составляет 850 мм, при этом киль имеет глубину 800 мм, а высота паруса - около 60 см. Однако, из-за технических особенностей бурения у основания мачты, проведенного ААНИИ, данные часто были искажены, в результате чего средняя глубина кия оказалась в три раза ниже, чем высота мачты. В дополнение к этому, были случаи, когда максимальные значения глубины кия не соответствовали максимальной высоте паруса, что подчеркнуло различия в измерениях [28].

В таблице 10 изложены ключевые морфометрические данные о консолидированном слое, также наблюдаемом в разных локациях. Исследование 84 точек дало возможность определить распределение консолидированного слоя среди зон, где преобладают участки с различной плотностью льда, включая плотный, твердый лед и пустоты. В двух случаях пришлось прервать бурение скважин из-за обнаружения значительных пустот, что сделало невозможным дальнейшее определение толщины слоя. Кроме того, в последних трех замерах было установлено отсутствие каких-либо консолидированных слоев. Также было отмечено, что в двух других случаях процесс замерзания льда был нарушен из-за наличия больших полостей, снижающих общее количество льда. Окружающая среда консолидированного слоя часто включала полусмерзшую шугу. На графике, представленном в рисунке 36, четко виден консолидированный слой льда. Это отображение основывается на данных, полученных во время бурения. Из анализа графика следует, что значения границ этого слоя отличаются не более чем на 2% от данных, зарегистрированных в зонах с различной плотностью льда. Кроме того,

из графика видно, что отношение площадей кривой, расположенной выше и ниже нулевой отметки, составляет 9,16, что указывает на значимое разделение содержания твердой фазы льда в зависимости от глубины. В сравнении с результатами кернового бурения, которое указывало среднюю толщину в 117 см на основе 18 точек, анализ 84 записей скорости бурения показал более низкую среднюю толщину консолидированного слоя в 109 см. Это значение считается более надежным из-за большего объема данных [29].

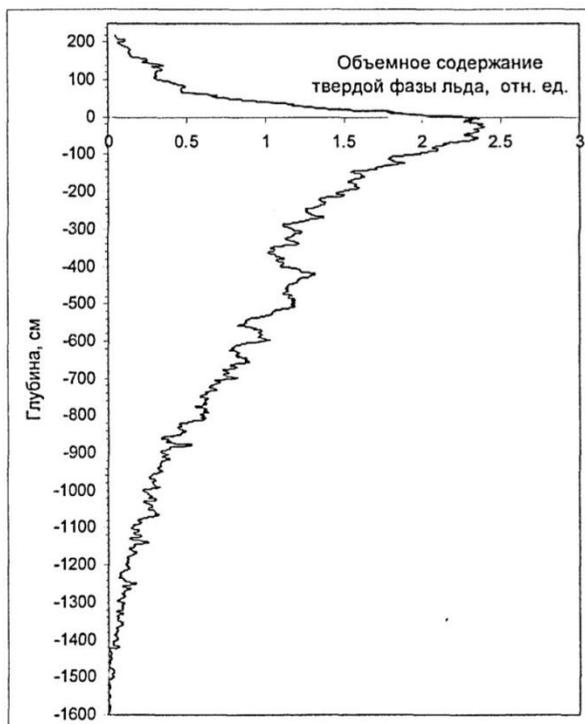


Рис. 36 - Распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине (по данным термобурения торосов шельфа о. Сахалин в 1998 г.)

Таблица 10

Основные морфометрические характеристики консолидированного слоя торосов и стамух на шельфе о. Сахалин (по данным электротермобурения в 1998 году).

	Торосы	Стамухи
Максимальное значение верхней границы КС, см	142	222

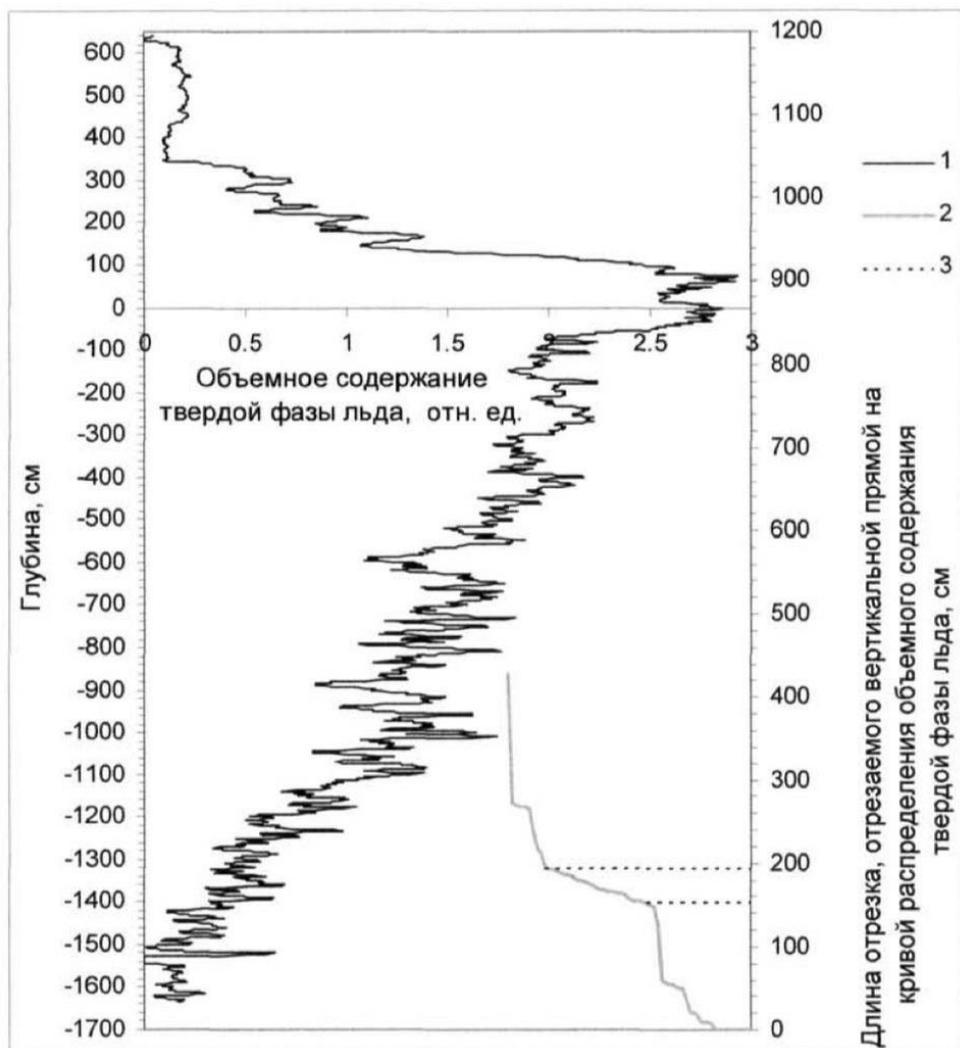
Среднее значение верхней границы КС, см	29	11
Минимальное значение верхней границы КС, см	-70	-22
Максимальное значение нижней границы КС, см	7	20
Среднее значение нижней границы КС, см	-81	-63
Минимальное значение нижней границы КС, см	-200	-178
Максимальная толщина КС, см	235	268
Средняя толщина КС, см	111	172
Минимальная толщина КС, см	18	22
Толщина КС по распределению объемного содержания твердой фазы льда, см	128	200
Максимум отношения толщина КС / общая толщина	1,00	0,20
Среднее отношения толщина КС / общая толщина	0,17	0,13
Минимум отношения толщина КС / общая толщина	0,03	0,07

Стамухи формируются из однолетнего льда, толщина которого равна 1,5 см. Используя данные, полученные с помощью электротермобура, было установлено, что средняя высота их паруса достигает 210 см, в то время как глубина кия составляет 1250 см. Однако, морфометрические показатели, измеренные водяным термобуром, показывают отличия по сравнению с теми, которые были определены через электротермоперенос. Различия в данных объясняются местом проведения бурения – в основном у основания паруса стамух, что подчеркивалось в предыдущих замечаниях по этому вопросу.

Исследования показали, что изменения в геометрии стамух, в частности соотношение между парусом и килем, четко коррелируют с фазами прилива. Во время проведения исследований на определенном участке, где наблюдались суточные и полусуточные колебания уровня моря с изменениями до 100 см в течение каждого 6-8 часового цикла, было замечено значительное изменение уровня моря. Эти данные свидетельствуют о том, что для точного определения структуры стамух необходимо учитывать общую толщину льда, поскольку только она остается константой в разных условиях.

Обобщенные характеристики внутреннего строения исследованных стамух приведены в табл. 10.

На изображении 37 представлены две графические зависимости, касающиеся объемного содержания льда в твердом состоянии. Первая из них, основанная на 18 измерениях скорости бурения, отображает размещение твердого льда. Вторая кривая иллюстрирует, как варьируется длина участка, формируемого при пересечении вертикальной линии с кривой распределения, и зависит от ее расположения[30]. Особенно стоит отметить, что присутствует сегмент на второй кривой с относительно меньшим уклоном, свидетельствуя о малых изменениях длины сегмента в соответствии с положением вертикальной линии. Это подчеркивает, что объемное содержание твердой фазы льда значительно колеблется на различных уровнях. Исходя из анализа данных, полученных в результате термобурения двух стамух, можно утверждать, что толщина их консолидированного слоя составляет примерно 174 см, как указано в таблице 10. Однако, учитывая наличие зон с разной плотностью льда, этот показатель может быть скорректирован до 172 см. В сравнении, общая оценка толщины такого слоя, основанная на более обширных исследованиях семи стамух в тот же период, равняется 180 см. Это число считается более точным и представительным для сезона 1997-98 годов, поскольку оно основано на большем объеме данных. Таким образом, результаты экспериментов, проведенных на большем количестве объектов, показывают незначительное, но важное увеличение средней толщины консолидированного слоя по сравнению с оценками, полученными при ограниченном количестве измерений[31].



1 - объемное содержание твердой фазы льда,

2 - длина отрезка, отсегаемого вертикальной прямой на кривой распределения объемного содержания твердой фазы льда;

3 - предполагаемые пределы толщины консолидированного слоя.

Рис. 37 - Распределение объемного содержания твердой фазы льда по глубине (по данным термобурения стамух шельфа о. Сахалин в 1998 г.)

Отношение средней толщины консолидированного слоя стамух к средней толщине ровного льда равняется 1,8.

В таблице 11 представлена информация, полученная в ходе электротермобурения 1998 года, о коэффициенте заполнения торосов. Отмечается, что в стамухах средний размер полости равен 20 см, тогда как в торосах он увеличивается до 33 см.

Основные сведения о коэффициенте заполнения торосов и стамух на шельфе о. Сахалин в 1998 году (по данным электротермобурения)

		Торосы	Стамухи
Средний, %	Парус	93	97
	Киль	77	86
	В целом	78	88

На рисунке 38 представлено сравнение объемного распределения твердой фазы льда на разных глубинах для двух регионов: торосов Печорского моря и шельфа острова Сахалин. Наблюдаемые различия в распределении объема могут быть связаны с разной мощностью льда в этих местах. В интересах анализа график, относящийся к Сахалину, был опущен на 30 см для учета смещения в данных. Соответствующий коэффициент корреляции между этими двумя распределениями составляет 0,6, что указывает на определенное сходство. Особенно похожи данные в интервале глубин от -400 до -650 см, где графики выглядят практически идентично. Также стоит отметить, что нагревание коронок термобура происходит за счет их тепловых свойств[32].

Появление двух выраженных пиков в распределении на определенной глубине можно объяснить процессом формирования вторичных торосов. В таких образованиях, где уже существует консолидированный слой толщиной приблизительно 50-60 см, что соответствует ширине данных пиков, происходит уплотнение. Этот процесс ведет к тому, что под воздействием гравитации от торосущего льда, верхний слой льда погружается и становится устойчивым на глубине. Наблюдения в глубинах 700 и 850 см показывают, что на этих уровнях присутствует плотный слой льда. Это подтверждается анализом внутренней структуры тороса, восстановленной с помощью данных из девяти термобуровых скважин[33].

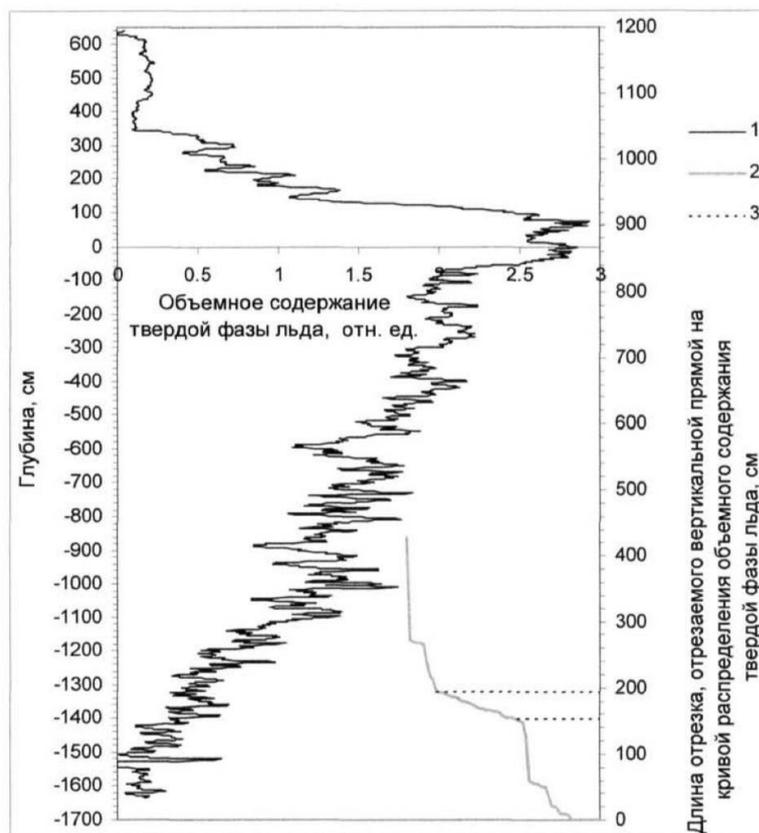


Рис. 38- Совместный график двух распределений объемного содержания твердой фазы льда по глубине: для торосов Печорского моря и торосов шельфа о. Сахалин

3.4 Выводы по главе 3

В главе 3 рассмотрены и изучены результаты исследования внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения. Проанализированы статистические характеристики исследованных торосов в Печорском море.

Проведен анализ изучения торосов в Арктическом регионе. Рассмотрены морфометрические характеристики исследованных торосов Арктических регионов. Изучены профили сечения торосов Арктического бассейна.

Изучены результаты исследования торосов и стамух на шельфе острова Сахалин с помощью электротермобурения и водяного бура. Рассмотрены основные морфометрические характеристики консолидированного слоя торосов и стамух на шельфе о. Сахалин.

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать выводы:

1. Торосы и стамухи представляют большую угрозу для мореплавания и хозяйственной деятельности в Арктике и требуют изучения для определения информации о геометрических размерах этих ледяных формаций, их пористости, толщине консолидированного слоя и других параметрах.

Стамухи имеют важную роль в динамике движения ледяных масс, а так же влияют на промерзание почвы, что должно учитываться при строительстве гидро-технических сооружений.

2. Наиболее актуальным и эффективными приборами для изучения внутреннего строения торосов и стамух являются электротермобуровые установки и термобуровые установки, работающие при помощи горячей воды .

3. В ходе анализа результатов исследования торосов и стамух методом термобурения определено, что данный метод дает наиболее точные и информативные результаты о внутреннем строении торосов и стамух.

В ходе работы использовалась актуальная оперативная информация и научные статьи, материалы, показывающие важность исследования внутреннего строения торосов и стамух.

Вышеуказанные данные получены в ходе выполнения выпускной квалификационной работы. Данные выводы указывают на то что, исследование внутреннего строения торосов и стамух методом термобурения является наиболее эффективным и актуальным.

Список используемой литературы

1. Ильинова А.А. Анализ проблем и перспектив инновационного развития Арктической зоны РФ/ А.А. Ильинова, В.М. Соловьёва// Россия в глобальном мире.– 2016.– № 9 (32) .– С. 253-265.
2. ПАО «НК «Роснефть». – Официальный сайт:
<https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/> (дата обращения: 03.04.2024)
3. ФГУП «Гидрографическое предприятие». – Официальный сайт:
<http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 06.03.2024)
4. Администрация Северного морского пути. – Официальный сайт:
<http://asmp.morflot.ru/> (дата обращения: 23.03.2024)
5. Большая российская энциклопедия – Официальный сайт:
<https://bigenc.ru/> (дата обращения: 14.04.2024)
6. Баталин Г.А. Навигационно-гидрографическое обеспечение в арктическом регионе / Г.А. Баталин, С.В. Решетняк // Морской флот.– 2008.– №3.– С. 34- 38.
7. Атлас Арктики.– М.: Изд. ГУГиК при Совете Министров СССР, 1985.
8. Наблюдение за ледовой обстановкой: Учебное пособие. – СПб.: ГУ «ААНИИ». – 2009. – 360 с.
9. Учебное издание Гидрометеорологическое обеспечение мореплавания. Учебник для вузов. – СПб . – 2014 . – 400 с.
10. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. ЕСИМО. – Официальный сайт: <http://www.russianports.ru/>
11. Карта «Моря Арктики» № 91050 (1:2000000) . – СПб.: ГУНиО, 1984.– 1л.
12. Йоханнессен О.М. Научные исследования в Арктике: т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на северном морском пути: изучение и применение / О.М. Йоханнессен, В.Ю. Александров, И.Е. Фролов, С. Сандвен, Л.Х. Петтерссон, Л.П. Бобылев, К. Клостер, В.Г.

- Смирнов, Е.У. Миронов, Н.Г. Бабич // Санкт-Петербург: Наука. 2007 г. – 512с.
13. Решетняк С. В. Северный морской путь. Численная оценка гидрографической обеспеченности трасс для судов с большой осадкой / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков // Геодезия и картография. – 2008. – № 6. – С. 59-61.
14. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли: Коллективная монография. / А.И. Канащенков. – Москва: Радиотехника. 2006 г. – 240 с.
15. Смирнов В.Г. Мониторинг опасных ледовых явлений с использованием спутниковой информации и модельных расчетов / В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова, Н.Ю. Захваткина, Е.У. Миронов, С.В. Клячкин // Метеорология и гидрология, 2019 г. – № 11. – С. 56-70.
16. Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт – официальный сайт: (дата обращения: 15.03.2024)
<https://www.aari.ru/>
17. ООО «Vizard» [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://vizard.tech/> (дата обращения 26.04.24)
18. Зубакин Г.К. Ледяные образования морей западной Арктики. / Г.К. Зубакин. – Санкт-Петербург: ААНИИ, 2006. – 281 с.
19. Бобылев Л.П. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования / Л.П. Бобылев, Е.В. Шалина, О.М. Йоханнессен, Е.В. Заболотских, С. Сандвен, О.И. Бабина
// Проблемы Арктики и Антарктики, 2008 г. – Т. 78. – № 1. – С. 38–47.
20. «СП-32» 2003-2004 гг. Отчет по программе работ «Исследование эволюции морфометрических характеристик ровного и торосистого льда в течение года». -СПб, фонды ААНИИ, 2004. -139 с

21. Харитонов, В.В. Экспериментальные исследования внутреннего строения торосов и стамух с помощью электротермобурения: канд. ф.-м. наук: 25.00.28: Харитонов Виктор Витальевич. – Санкт-Петербург, 2005. – 26 с..

22. Харитонов, В.В. Стамухи: термины и методы исследования / В.В. Харитонов, В.А. Бородкин // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XXIV. – № 4. – С. 17–22

23. Харитонов, В.В. Метод исследования внутреннего строения торосов и стамух с помощью технологии термобурения / В.В. Харитонов, В.А. Морев // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 7. – С. 49–58.

24. Харитонов, В.В. О результатах исследования эволюции консолидированного слоя молодого тороса в высокоширотной арктической экспедиции на дрейфующей станции «Северный полюс – 33» / В.В. Харитонов, В.А. Морев, В.Л. Кузнецов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2008. – Вып. 75, – С. 119–122.

25. Суханов Л.А. Комплексное применение методов электромагнитного зондирования и термоэлектробурения для исследования неоднородных горных ледников: Автореф. дисс. на соиск. учен. ст. к. т. н. -М, 1979. -20 с.

26. . Морев В.А., Морев А.В., Харитонов В.В. Способ определетш структуры торосов и стамух, свойств льда и границы льда и грунта. Патент России № 2153070 от 20.07.2000. Бюллетень № 20.

27. . Морев В.А. Электротермобуры для бурения скважин в ледниковом покрове/ТМатериалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждение. -1976. -№28.-С. 118-120.

28. Миронов Е.У., Морев В.А., Порубаев В.С., Тюряков А.Б., Харитонов В.В. Метод водяного термобурения для исследования внутренней структуры ледяных образований/ТТруды РАО. Санкт-Петербург, Россия, 16-18 сентября 2003, -С. 247- 252.

29. Таврило В.П., Трищенко В.Д., Лоцилов В.С. К вопросу о натуральных исследованиях морфологии торосов на арктических льдах и возможности

моделирования процессов торошения//Труды ААНИИ. -1974. -Т. 316, -С. 70-76.

30. Тордиенко Е.В. Экспериментальное изучение процесса развития однолетних торосов и оценка влияния этого процесса на расчет сооружений шельфа//Труды РАО. С.-Петербург, Россия, 16-19 сентября 2003 г.,-С. 444-448.

31. . Сурков Г.А. Внутреннее строение торосистых образований шельфа Северного Сахалина//3-я международная конференция «Освоение шельфа арктических морей». 23-26 сентября 1997, Рефераты докладов. -С. 181.

32. Технический отчет по результатам комплексных ледоисследовательских работ в Печерском море в апреле 1999 года («Печора 99») / Под ред. Г.К. Зубакина. -С.-Петербург. Фонды ААНИИ (№Р-5144). 1999. -196 с.

33. Технический отчет (1997в) по результатам комплексных инженерных изыскательских работ в Печерском море по проекту Приразломного НМ (Печора 97). Стадия «Проект» / Под ред. Г.К. Зубакина. -С.-Петербург. Фонды ААНИИ. 1997.-364 с.