

Экспедиции на НЭС «Северный Полюс» – новый этап изучения высокоширотной Арктики

¹ *Московский государственный университет, г. Москва*

² *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург*

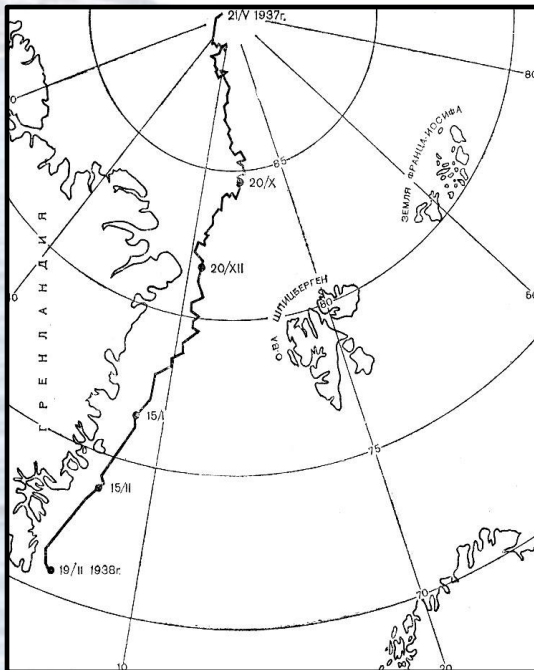
СОДЕРЖАНИЕ

- ❑ Введение (краткий исторический экскурс)
- ❑ Ледостойкая Самодвижущаяся Платформа (ЛСП): наука и жизнь
- ❑ Атмосферные исследования: задачи и их реализация
- ❑ Океанологические исследования: задачи и их реализация
- ❑ Атлантификация бассейна Нансена по данным прямых измерений
- ❑ Заключение (перспективы дальнейшего использования ЛСП)

Истоки...



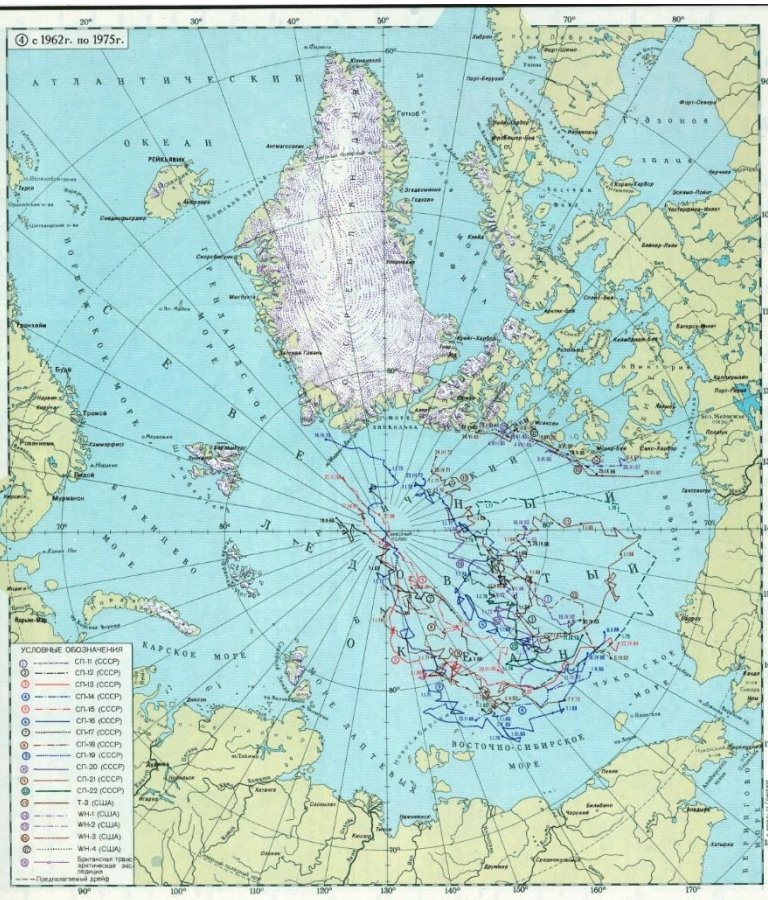
Двадцать первого мая 1937 года в географической точке Северного Полюса был поднят государственный флаг СССР, ознаменовав начало длительной истории советских дрейфующих полярных станций «Северный полюс» (СП).



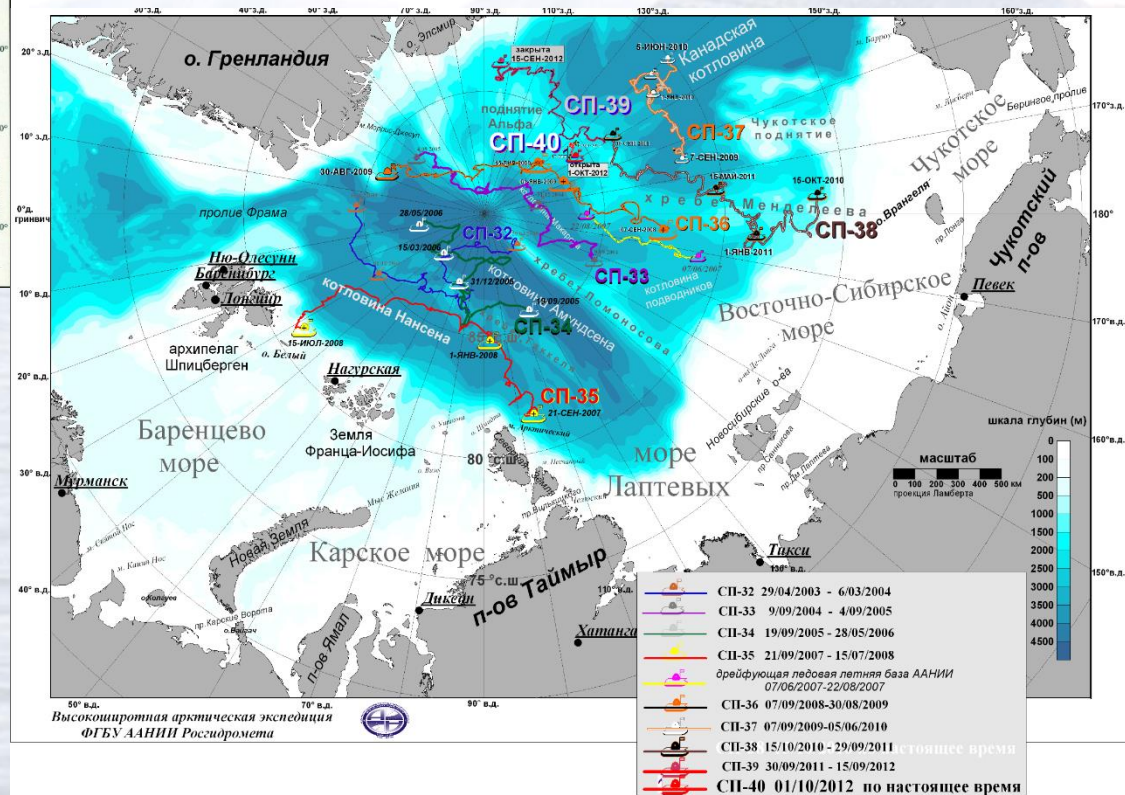
Страницы истории

С 1954 по 1991 год

В Арктическом бассейне постоянно дрейфовали 1-2 круглогодичные станции и до 3-х сезонных станций. Всего с **1937 по 1991 гг.** на арктическом дрейфующем льду под руководством ААНИИ отработала **31** круглогодичная СП. 25 июня 1991 г. последняя советская СП-31 завершила свою работу



История круглогодичных российских СП, базировавшихся на дрейфующем льду, началась в 2003 г. (СП-32) и завершилась в 2012 г., (СП-40) в связи с резкими изменениями состояния ледяного покрова



СП-18, 1969



Наука и жизнь на дрейфующем льду

Введение

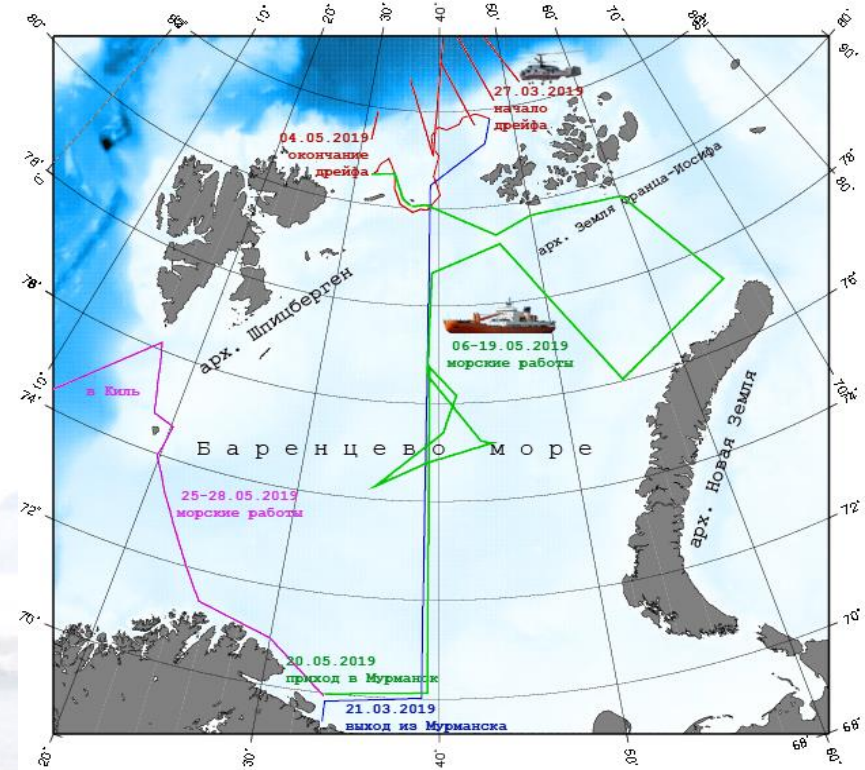
Организация научных исследований и быта полярников на дрейфующих станциях в 20-м веке и в начале 21-го века принципиально не отличались: и жизнь и работа проходили на дрейфующем льду, что вносило значительный элемент риска и требовало постоянного внимания к возможному возникновению чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением ледяного поля, опасными метеорологическими явлениями, появлением белых медведей и др.

СП- 40, 2012



Новый подход к организации исследований в высокоширотной Арктике

Невозможность продолжения экспедиций, базирующихся на дрейфующем льду, привело к концепции дрейфующей станции нового типа, так называемой «судно – лед». Логистика такой станции включает судно, замороженное в лед и дрейфующее вместе с ним и обширный измерительный полигон, развернутый вокруг судна и оснащенный измерительным оборудованием для выполнения широкого круга научно-исследовательских задач.



В марте – мае 2019 года в рамках экспедиции «Трансарктика-2019» была организована тестовая дрейфующая станция типа «судно-лед» в северной части Баренцева моря на НЭС «Академик Трешников». Результаты этой экспедиции убедительно показали возможность и перспективность проведения комплексных научных исследований природной среды Арктики с использованием дрейфующей станции нового типа.

СОДЕРЖАНИЕ

□ Введение (краткое резюме)

□ **Ледостойкая Самодвижущаяся Платформа (ЛСП): наука и жизнь**

□ Океанологические исследования на ЛСП: задачи и их решение

□ Некоторые предварительные результаты

□ Атлантическая и Арктическая бассейны: Хансена по ледовой платформе

□ Заключение (перспективы дальнейшего использования ЛСП)

Ледостойкая самодвижущаяся платформа (ЛСП) «Северный Полюс»

ЛСП



Водоизмещение (т)	10390
Длина, (м)	86
Ширина, (м)	27
Высота борта (м)	11.5
Осадка (м)	8.4
Мощность ГЭУ (кВт)	825
Автономность (сут)	365

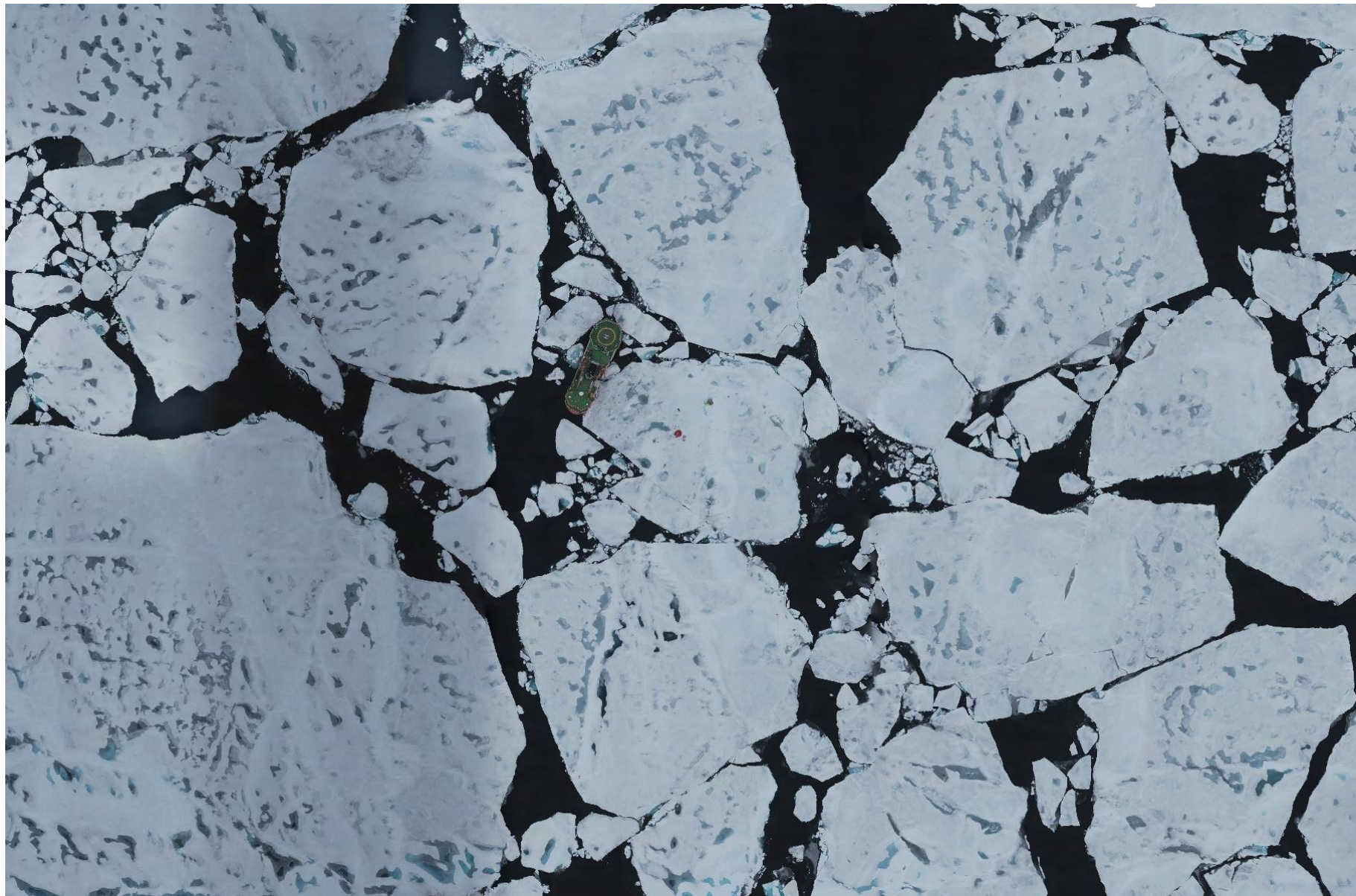
Экипаж 14 чел.
Экспедиция 34 чел.

Практическая реализация дрейфующих станций типа «судно-лед» началась после ввода в эксплуатацию судна «Северный Полюс» (проект: 00903, класс: КМ Arc5 AUT-1C HELIDECK-F), построенного на Адмиралтейских верфях в Санкт-Петербурге и предназначенного для создания на его основе постоянных дрейфующих станций — аналогично дрейфующим станциям Северный Полюс, размещавшимися на льду. Судно было спущено на воду в 2020 году, ввод в строй состоялся летом 2022 года. Первым применением судна стала экспедиция «Северный полюс-41» (сентябрь 2022 – май 2024).

Дрейфующая станция «судно-лед» СП-42



ЛСП и ледовый лагерь «СП-42» (с высоты 100 м)



17.08.2025

Ангар



Пеленгаторная палуба



Кормовая зона



Работы на льду

Бурение



Вырубка «кабана»



Исследование новой трещины



Подготовка к выезду на ледовый полигон



Пробоотбор в океанологическом терминале



В лабораториях на судне и на льду...

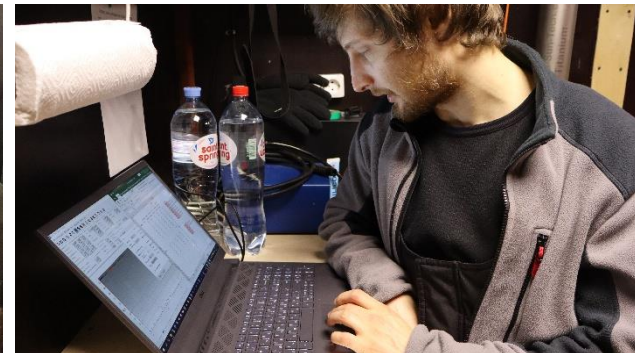
Гидрохимическая



Ледовая



Океанологическая



Геофизическая



Палатка океанологов



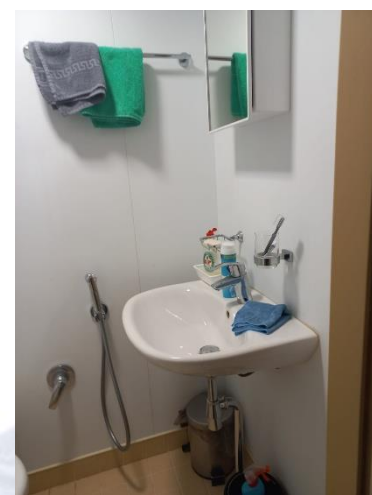
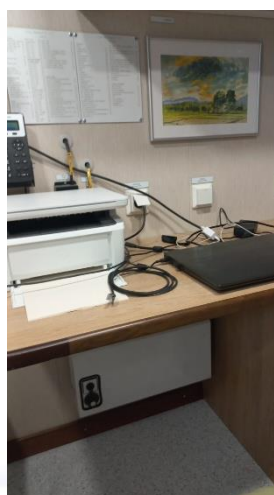
Палатка ледовиков



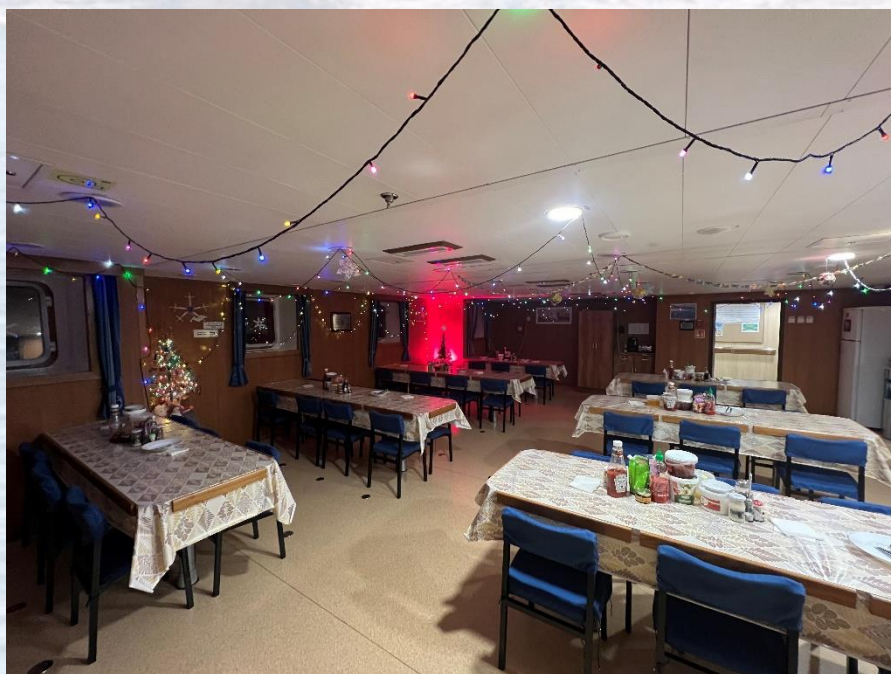
Не лаборатория, но тоже важная работа...



Панорама каюты



Столовая



Тренажерный зал



Атмосферные исследования: стандартные (8-ми срочные) метеорологические измерения, аэрологические зондирования (2 раза в сутки). Специальные метеорологических наблюдений за содержанием водяного пара, газовым составом атмосферы, температурно-ветровыми параметрами атмосферы, характеристиками снежного покрова и др. В период полярного дня актинометрических измерения суммарной и отраженной солнечной радиацией и ее спектрального состава.

Ледовые исследования: изучение физико-механических характеристик льда на полигонах ровного льда и грядках торосов. Измерения физических параметров льда и снега на ровном льду, у торосов и на консолидированном слое торосов, а также измерения прочности льда при центральном изгибе круглых пластин. Отслеживание консолидации наслоенного льда с помощью термокосы, мониторинг динамики льда с использованием измерительной системы, состоящей из трех разнесенных сейсмостанций. Специальные эксперименты: исследование внутреннего строения торосов с помощью электротермобурения, изучение расслоения льда при торошении.

Океанологические исследования: изучение структуры водных масс и тонкоструктурных термохалинных неоднородностей по маршруту дрейфа посредством ежедневного CTD-зондирования со льда или с борта судна, непрерывная регистрация температуры в верхнем слое воды термокосой, непрерывные АДСП-измерения течений в верхнем 200-метровом слое.

Гидрохимические и экологические исследования: отбор проб морской воды со стандартных горизонтов и горизонтов, определенных согласно STD-профилированию, с последующим проведением гидрохимических анализов. Послойный отбор проб кернов льда и интегральных проб снега на ледовых полигонах с последующим лабораторным анализом. Отбор и консервация проб на органические загрязнители, тяжелые металлы в воде, льду и снегу для последующего анализа на берегу.

Гидробиологические исследования: отбор проб зоопланктона сетью Джеди по маршруту дрейфа – облов поверхностного слоя 0 -100 м чередовался с послойным обловом всей водной толщи от дна до поверхности на стандартных горизонтах. Отбор проб фитопланктона по маршруту дрейфа сетью Апштейна с фиксацией формалином для дальнейшей обработки в стационарных условиях. В дополнение к пробам фитопланктона, отбирались пробы на содержание хлорофилла А. Отбор проб ледовых кернов для исследования криофауны производился 3 раза в месяц.

Геологические исследования: пробоотбор грунтовой трубкой, дночерпателем «Океан» и бокс-корером. Частота точек опробования определялась особенностями рельефа дна и скоростью дрейфа. Извлеченная из трубки колонка частично сохранялась для дальнейшего отбора проб на палеомагнитный анализ, гранулометрический и минералогический анализ и споро-пыльцевой анализ в стационарной лаборатории, а частично использовалась для набортных экспресс-анализов. Из дночерпателя отбирался поверхностный и подповерхностный интервалы на литолого-минералогические и на органо-геохимические исследования. Проводились дозиметрические и радиометрические измерения.

Геофизические исследования: непрерывная регистрация абсолютных значений и вариаций модуля магнитного поля Земли и ее трех составляющих, постоянная регистрация разнесенных датчиков ГЛОНАСС/GPS, тестирование погружного дифференциального магнитометра, наблюдения за пространственной структурой сверхнизкочастотных и особо низкочастотных излучений, наклонное зондирование ионосферы, наблюдения за уровнем ультрафиолетового индекса.

Изучение прочностных характеристик ЛСП: непрерывная регистрация данных о напряженно-деформированном состоянии корпуса при действии ледовых сжатий, сопровождаемых разрушением льда под бортом платформы, испытания образцов по определению прочностных свойств базового ледяного поля, регистрация данных подсистемой мониторинга напряженно-деформированного состояния базового ледяного с помощью выносных вмораживаемых датчиков давления, толщиномерная съемка вокруг бортов судна.

Технология наблюдений с дрейфующих станции в СЛО:

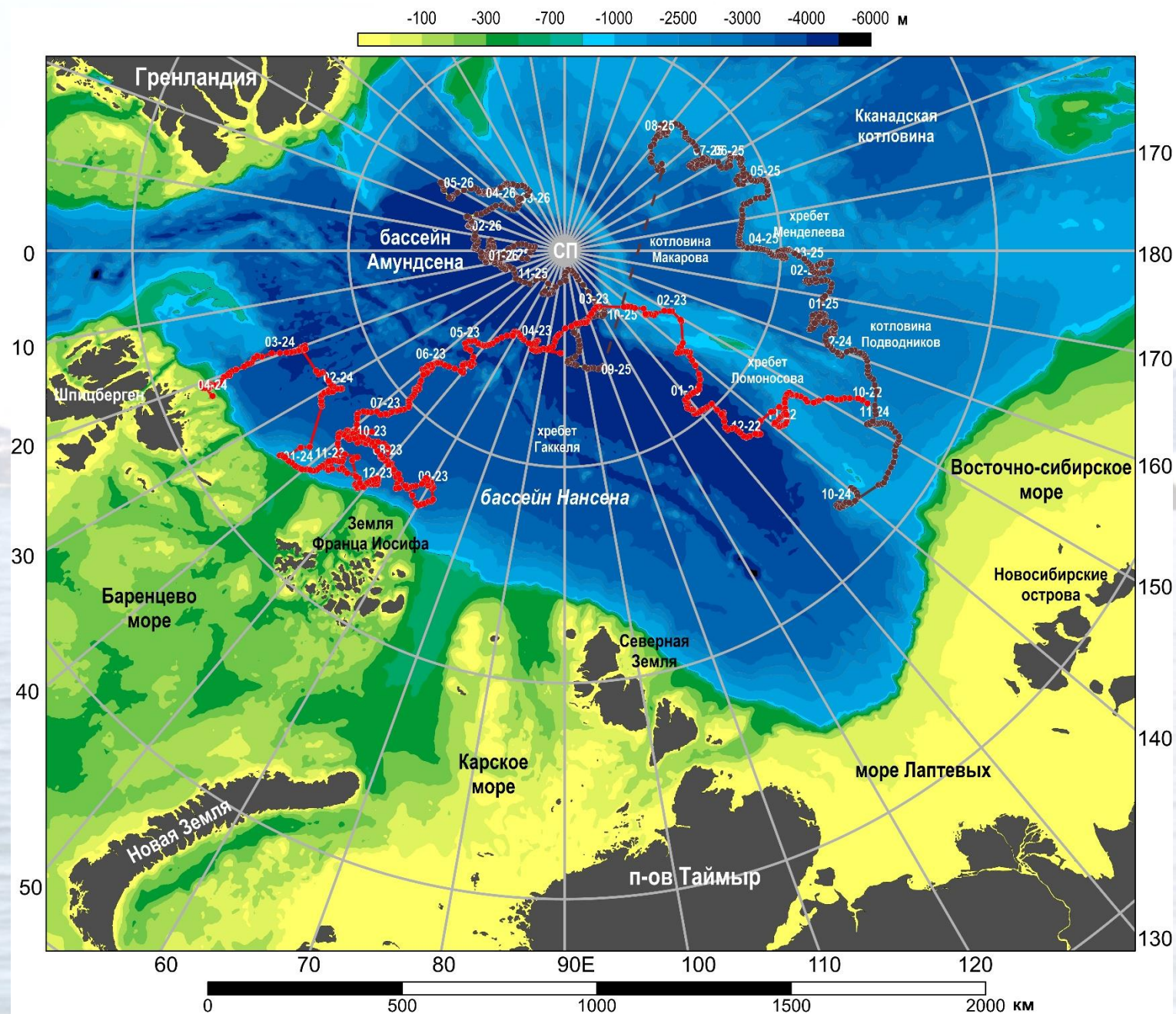
достоинства и недостатки

- ✓ Возможность круглогодичного мониторинга гидрометеорологических процессов в труднодоступных районах.
- ✓ Возможность постановки специальных натурных экспериментов в различные сезоны года.
- Отсутствие контроля за перемещением дрейфующей платформы: измерения проводятся не там, где предпочтительнее, а там, где окажется ледовый лагерь.
- Продолжительное время нахождения участников в экспедиции без возможности ротации – сложность с подбором квалифицированных кадров.
- Значительные финансовые затраты.

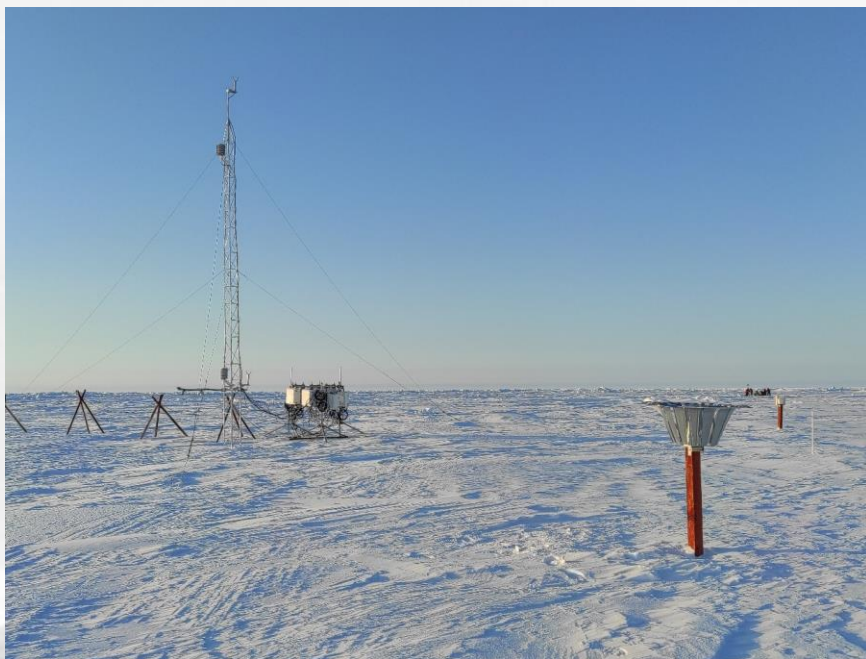
СОДЕРЖАНИЕ

- Введение (краткая история ЛСН)
- Ледостойкая Саломея (ЛСН) и ее роль (ЛСН): наука и жизнь
- **Атмосферные исследования: задачи и их реализация**
- Основные предварительные результаты
- Атмосферная бассейна Хансена по ледостойкости (ЛСН)
- Заключение (перспективы дальнейшего использования ЛСН)

Траектории дрейфа «СП-41» и «СП-42»



Стандартные (8-ми срочные) метеорологические измерения



Общий вид метеорологической площадки.
За период октябрь 2022 года – апрель 2024 года
проведено 4608 метеорологических измерений

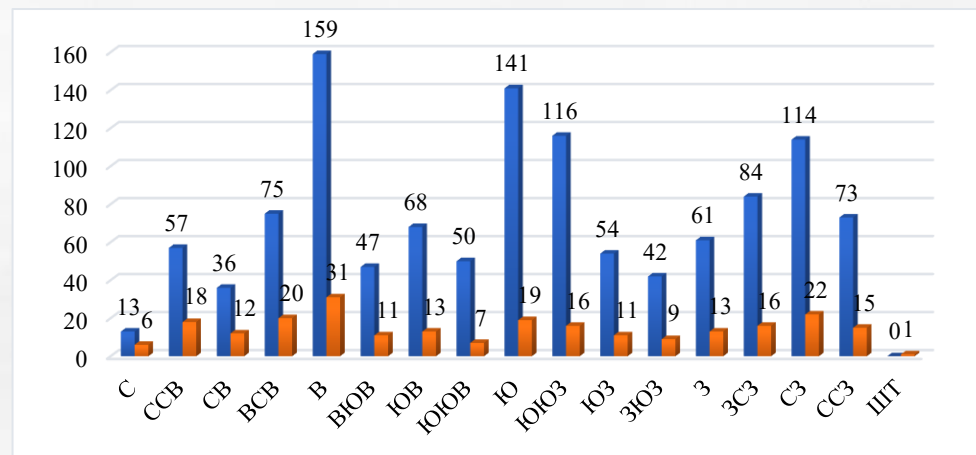
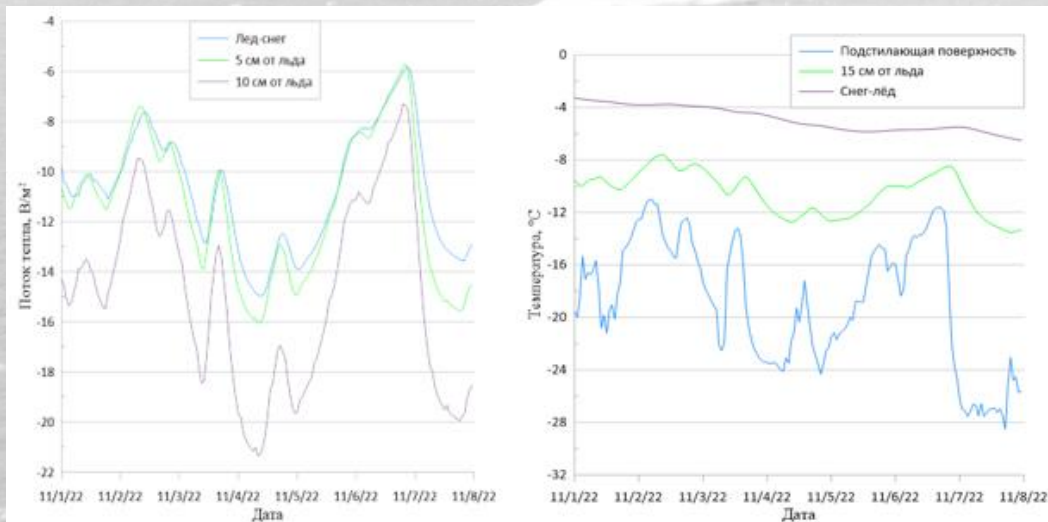


Диаграмма количества случаев и суммы скоростей ветра
за период 01.04.2024–30.04.2024

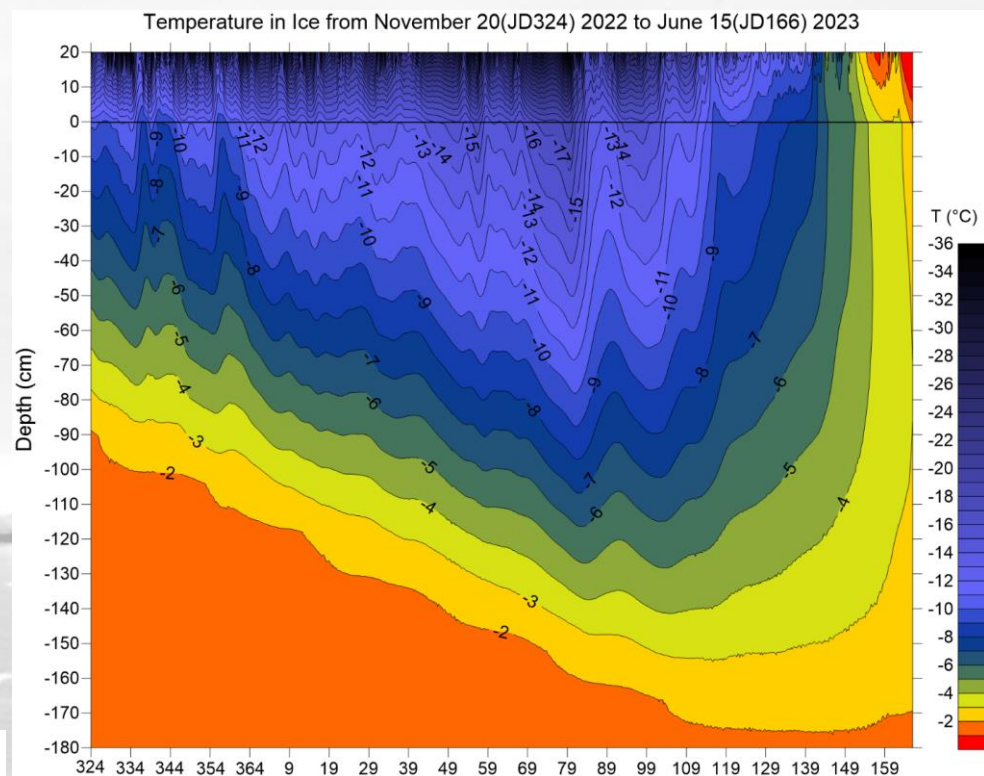


Распределение потоков тепла и
температуры на различных уровнях
снежно ледяного покрова с 01 по 07
ноября

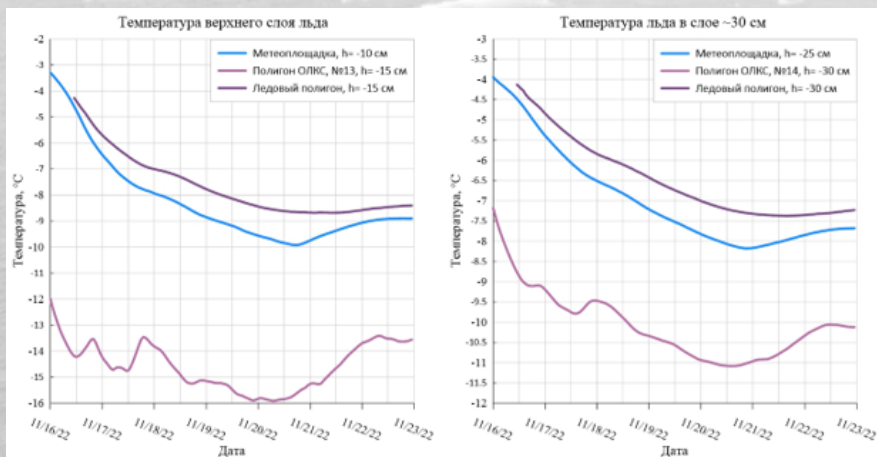
Ежечасные измерения температуры снежно-ледяного покрова с помощью термокос GeoPrecision фирмы GP5W Shell



Считывание данных с термокосы

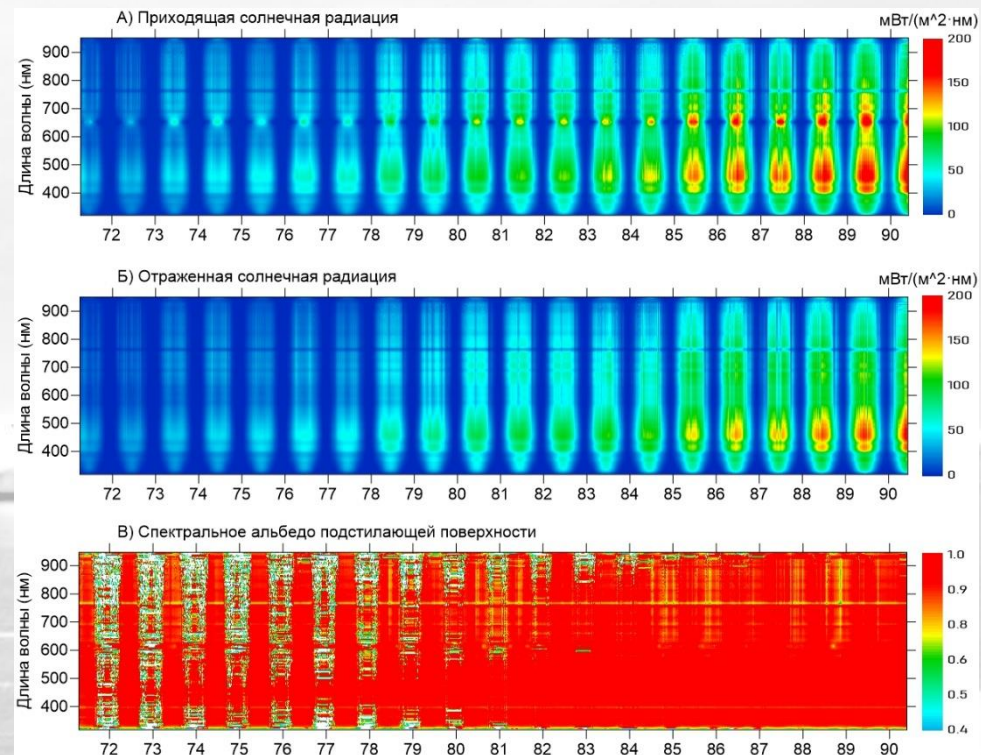


Временная изменчивость температурного режима
ледового поля в районе Ледового полигона



Распределение температур толщи льда, полученных с
данных термокос за период 16–23 ноября 2022 года

Спектральные измерения приходящей, отраженной и проникающей под лёд коротковолновой радиации в диапазоне длин волн 350 – 900 нм



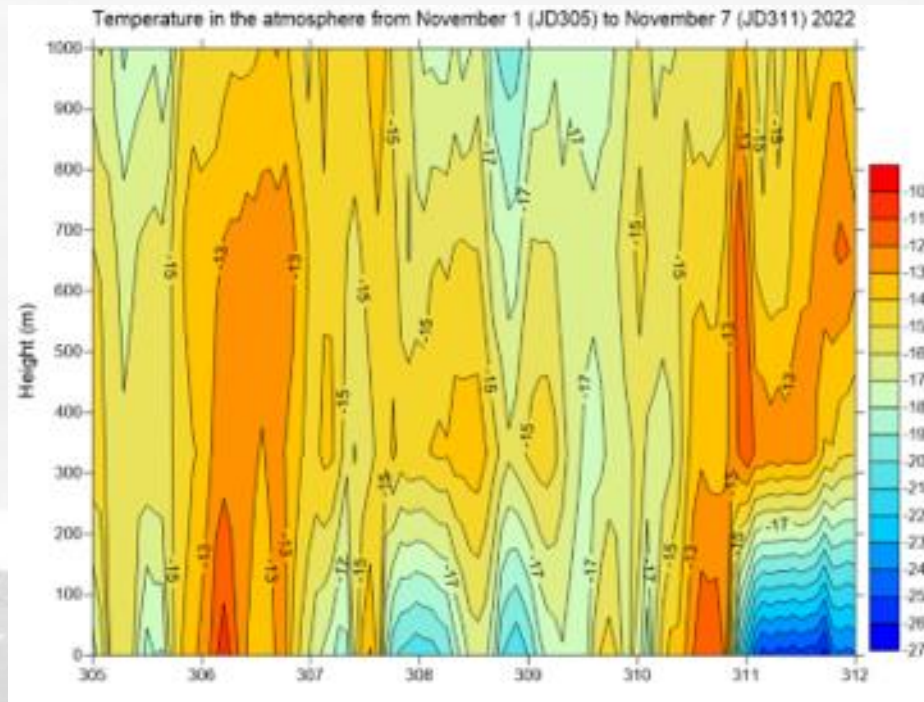
Результаты работы спектрометров Ramses-acc-vis в период с 11 по 31 марта 2024 года

Спектрометры RAMSES, слева приборы, установленные над поверхностью льда, справа – подводная часть

Регистрация с 5-минутной дискретностью изменений температуры от поверхности до 1000 м

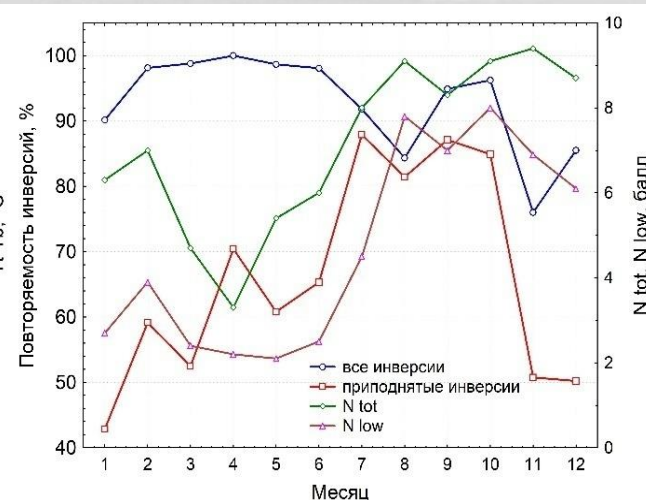
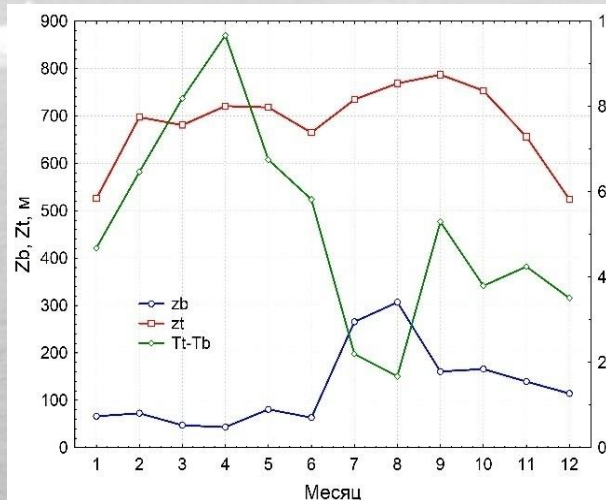


Метеорологический температурный профилемер на борту ЛСП

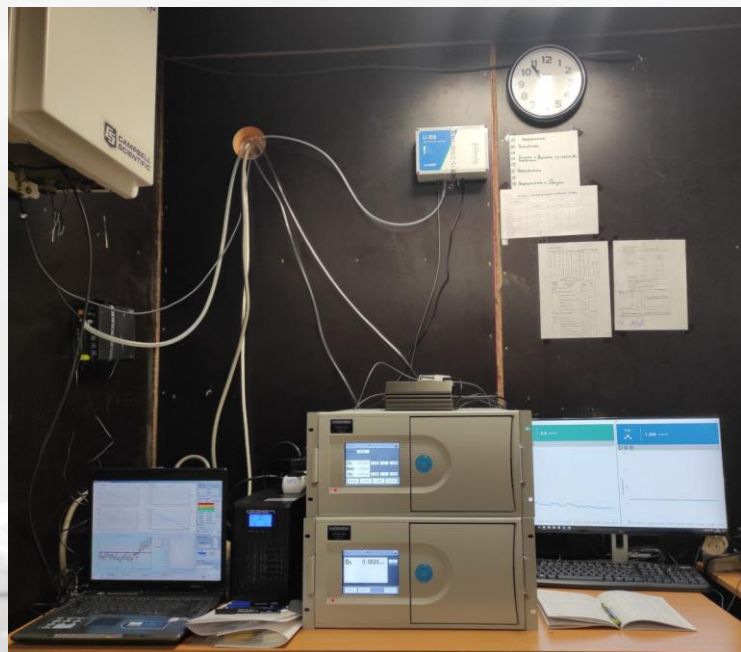


Распределение температуры воздуха в слое 0 – 1000 м с 01 по 07 ноября

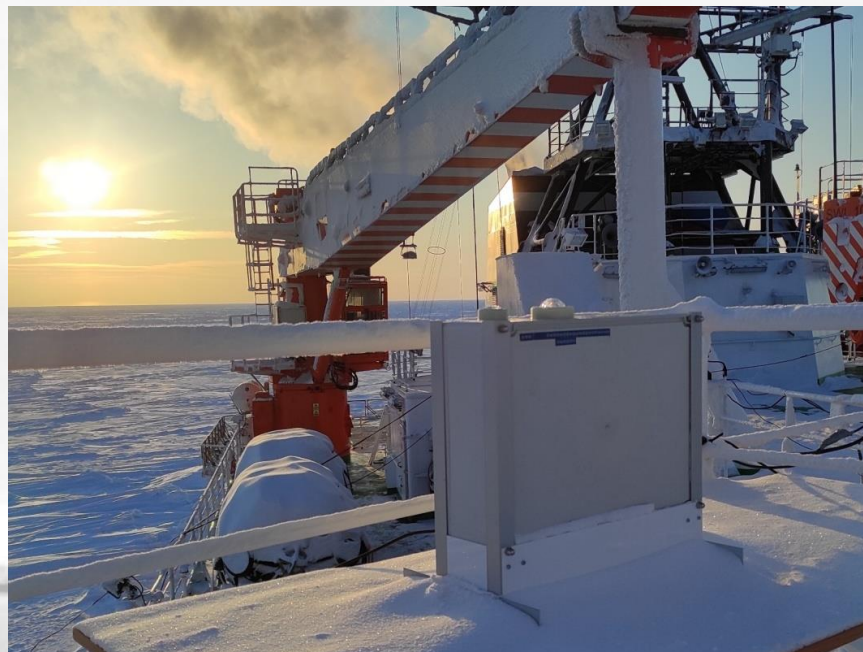
Внутригодовая изменчивость среднемесячных характеристик инверсий в НСА и среднемесячных значений балла общей (N tot) и нижней облачности (N low)



Измерения содержания парниковых газов и озона в приземном слое воздуха

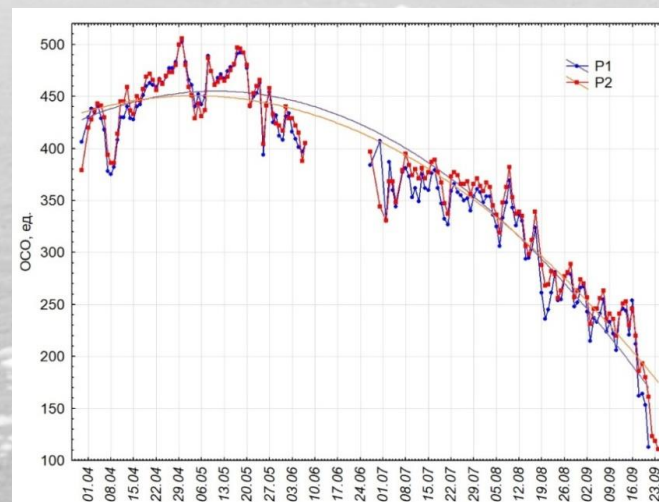


Общий вид ледового пункта измерений парниковых газов и атмосферного аэрозоля



Ультрафиолетовый озонный спектрометр (УФОС) установленный на крышу рубки ЛСП

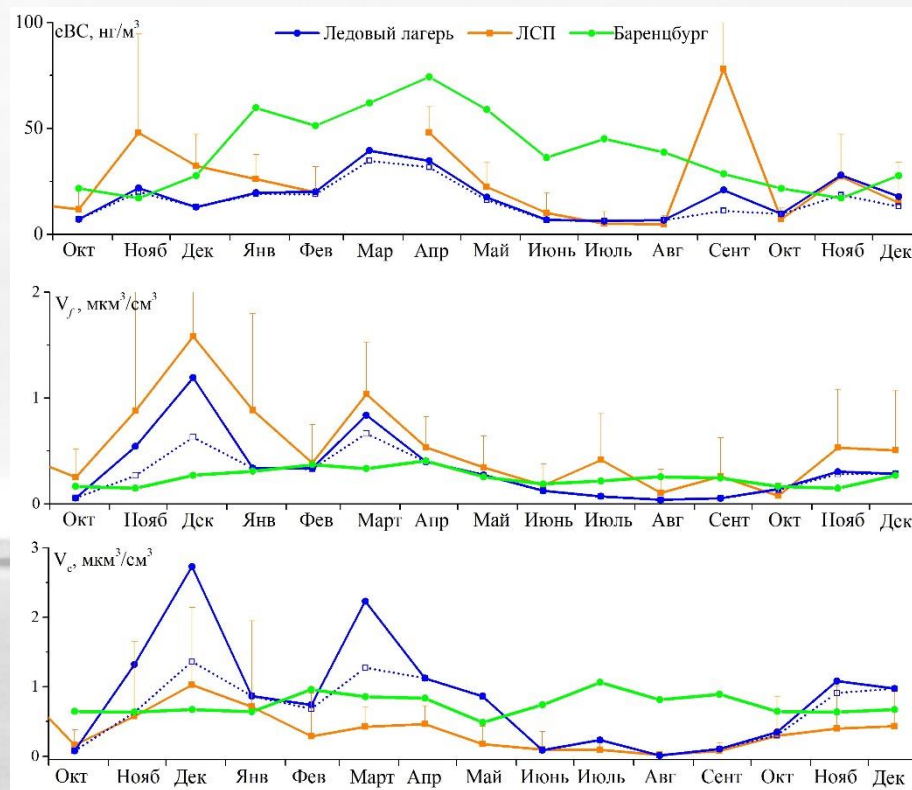
Общее содержание озона
(среднесуточные значения ОСО)



Исследование физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля

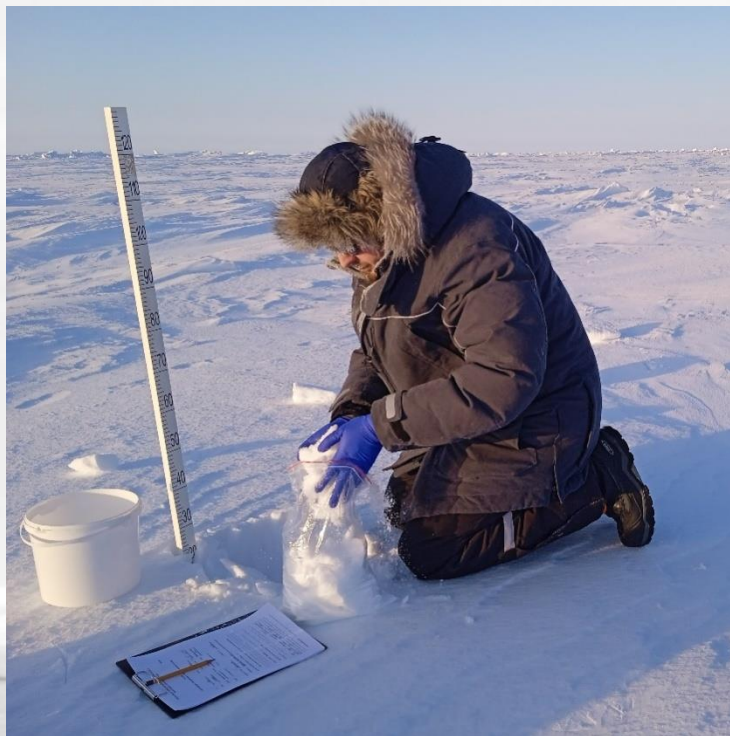


Многоканальная вихревая воздуходувка в ледовом лагере, на удалении 200 м от судна



На основе полученных данных рассчитывались среднечасовые значения следующих характеристик: объемные концентрации субмикронного (радиус 0,15 – 0,5 мкм) и грубодисперсного (радиус 0,5 – 5 мкм) аэрозоля (V_f , V_c), массовая концентрация поглощающего вещества в эквиваленте элементного черного углерода (eBC).

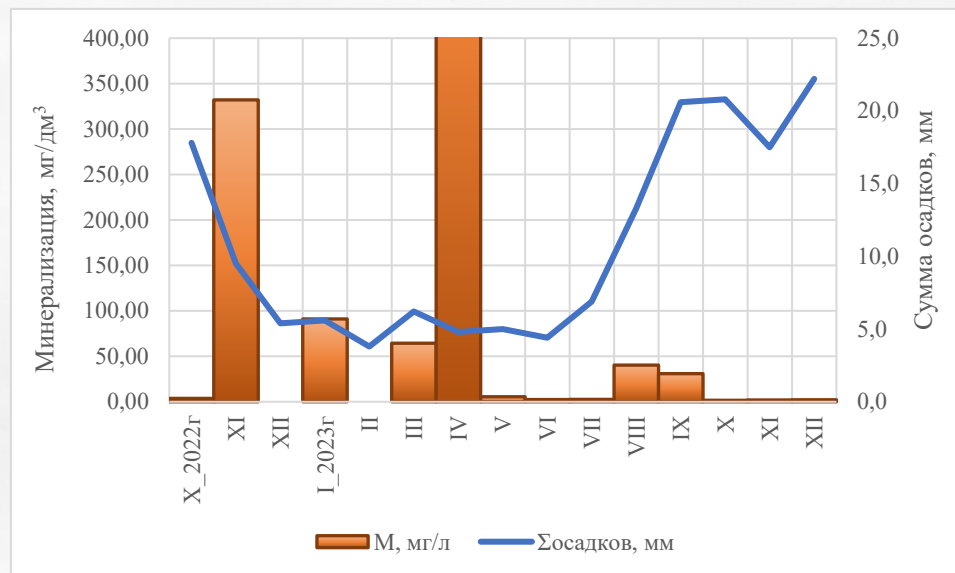
Анализ проб атмосферных осадков и снежного покрова



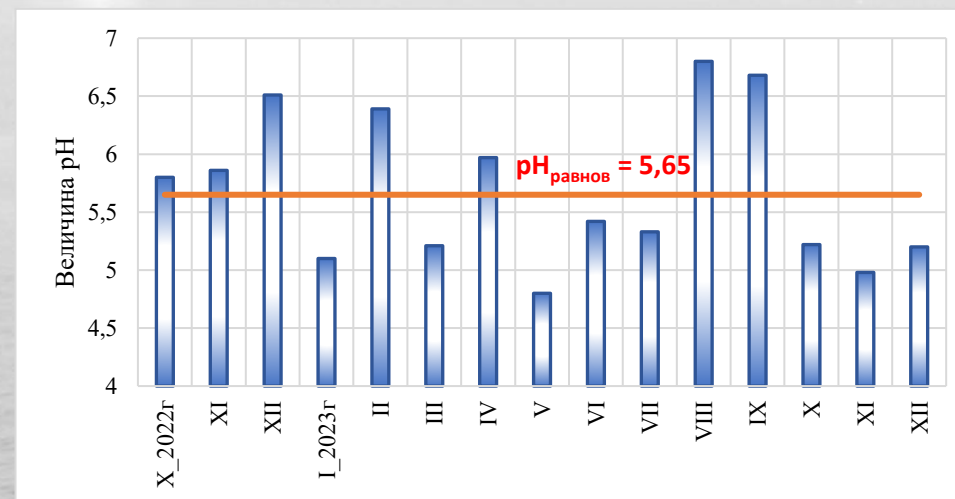
Отбор проб снежного покрова



Влажные выпадения компонентов с атмосферными осадками



Минерализация атмосферных осадков

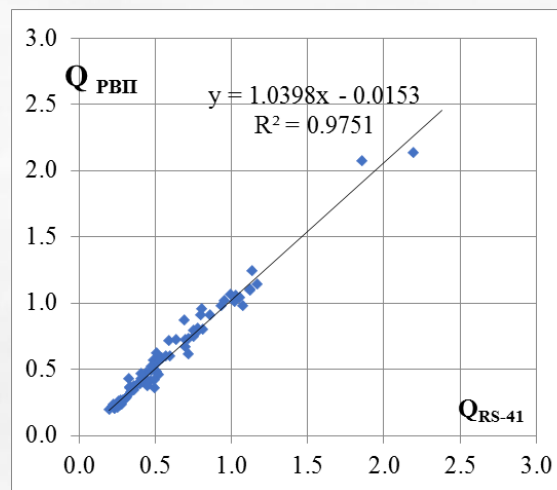


Величина pH в пробах атмосферных осадков

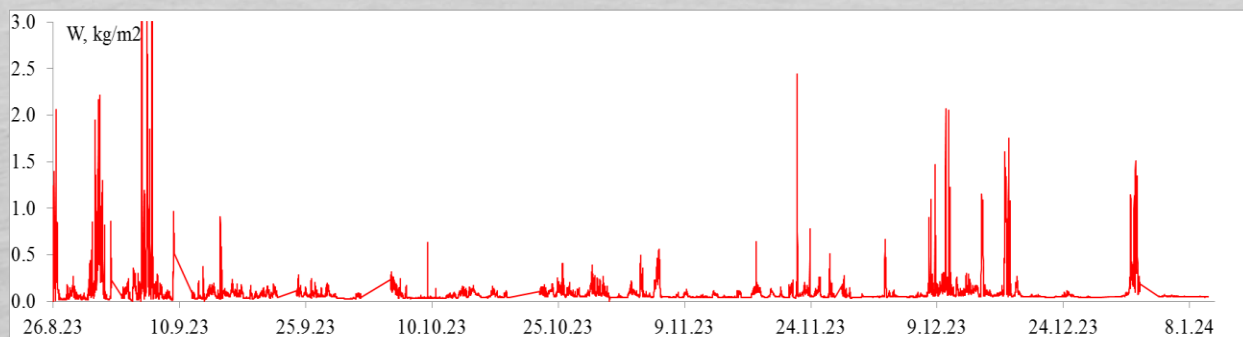
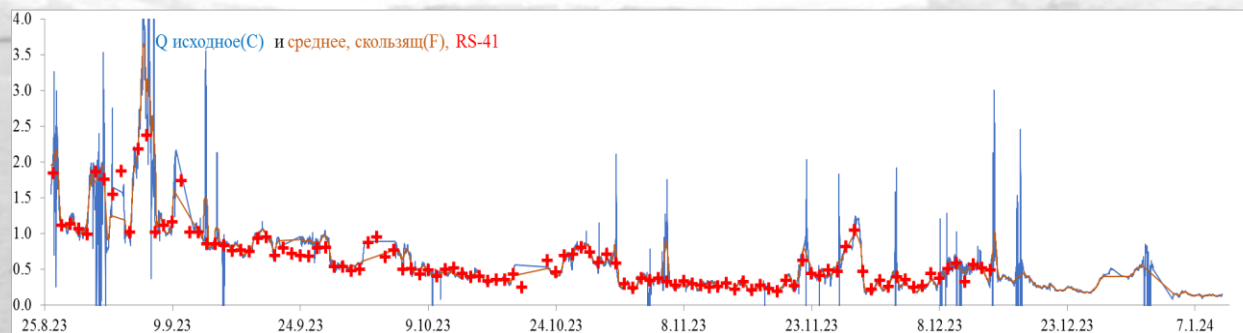
Радиометрическая система – радиометр водяного пара



Общий вид радиометра водяного пара



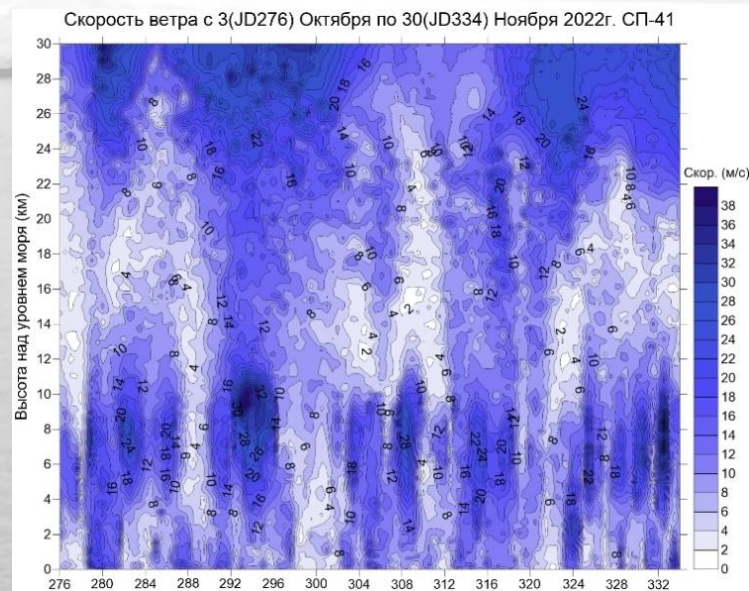
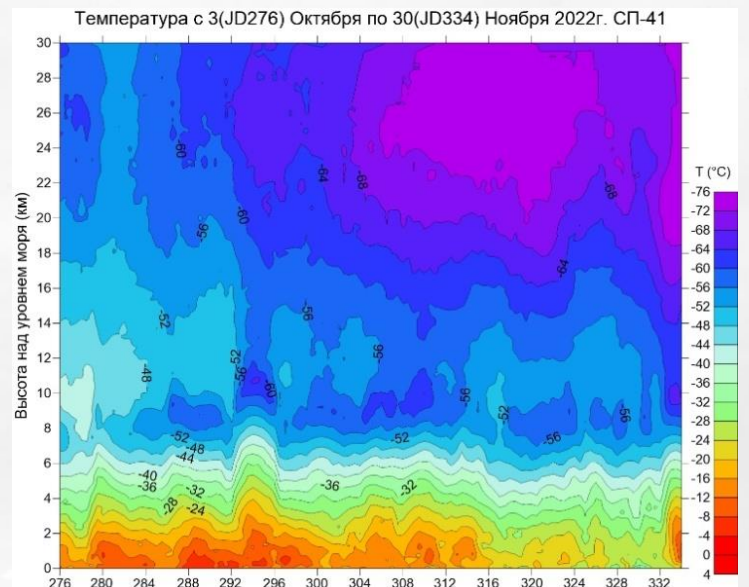
Влагосодержание
по данным РВП и
радиозондов



Вариации интегрального
влагосодержания (Q) и
водосодержания облаков (W)
(внизу). Кресты – данные
радиозондов RS-41 (ТАЭ-3).



Выпуск аэрологического зонда МРЗ-Н1

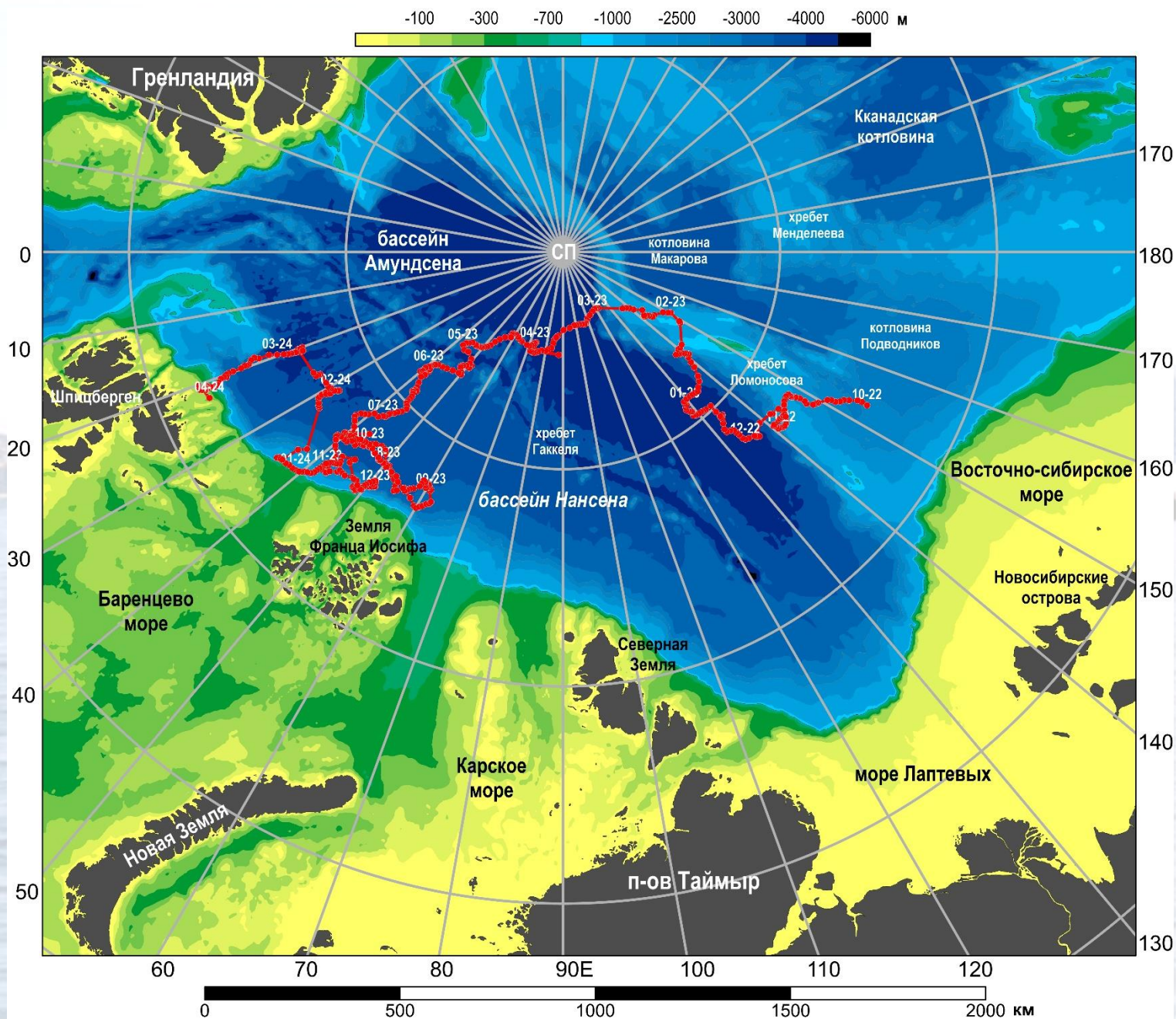


Распределение температуры и скорости ветра в слое 30 км.

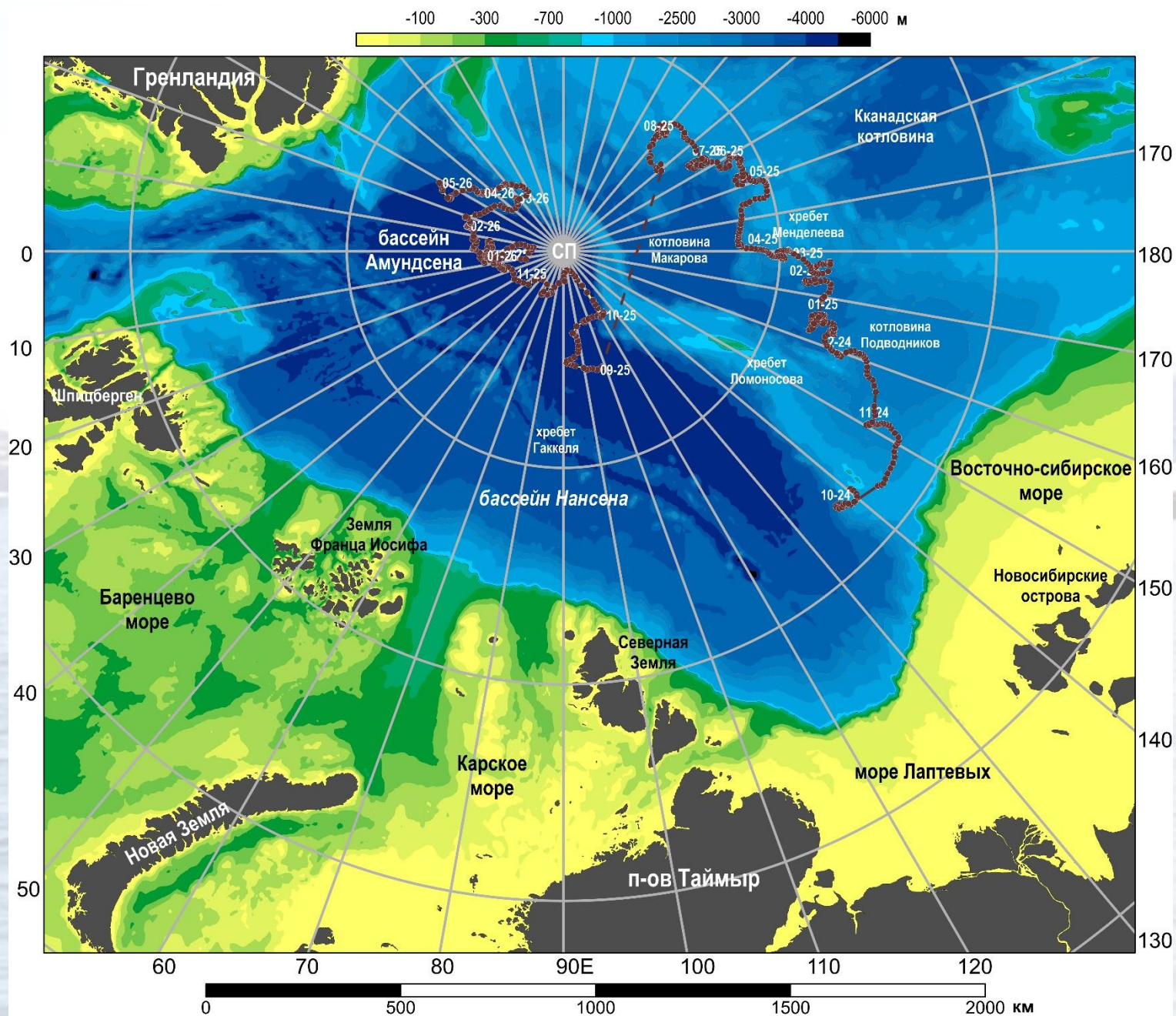
СОДЕРЖАНИЕ

- Введение (краткая история ЛСН)
- Ледостойкая Самостоятельная Экспедиция (ЛСЭ): наука и жизнь
- Океанологические исследования на ЛСЭ: задачи и их реализация
- **Океанологические исследования: задачи и их реализация**
- Арктическая бассейна Хансена по ледовым условиям
- Заключение (перспективы дальнейшего использования ЛСЭ)

Траектория дрейфа «СП-41» с 10.2022 до 05.2024

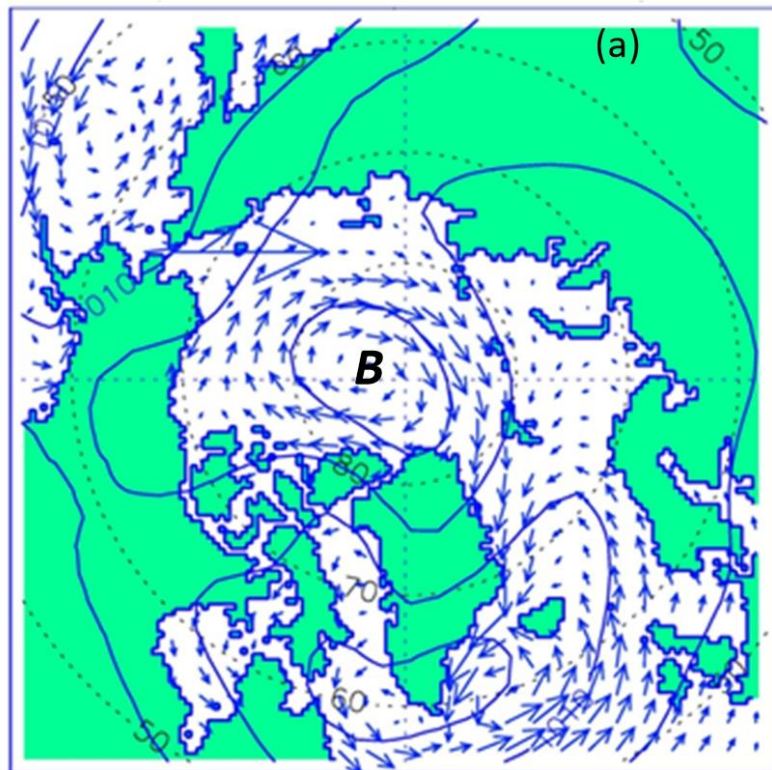


Траектория дрейфа «СП-42» с 10.2024 до 05.2026

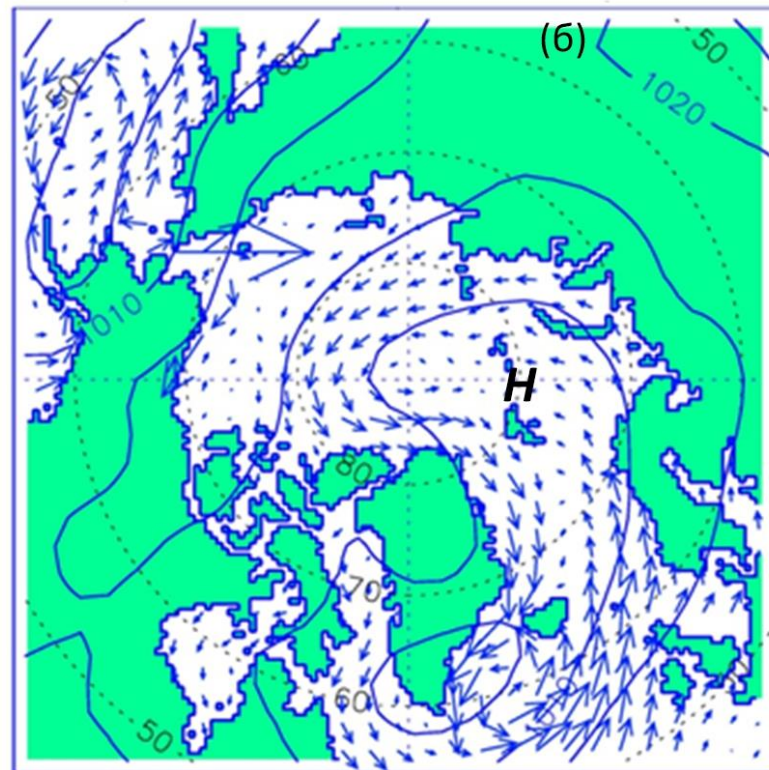


Основные режимы атмосферной циркуляции над СЛО

Антициклонический (А)

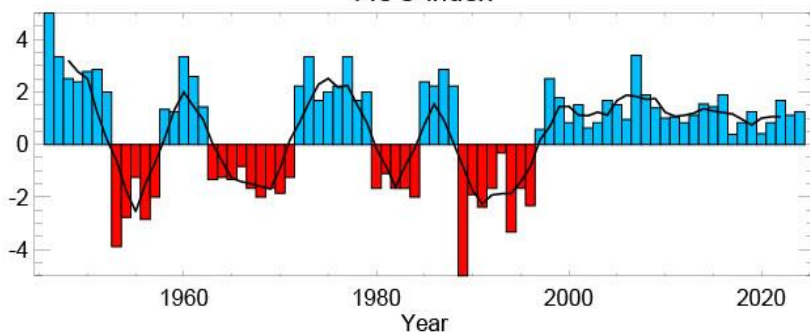


Циклонический (Ц)



[Proshutinsky and Johnson, 1997]

AOO index



Предположительно, летом 2023 года произошла перестройка режима атмосферной циркуляции с «А» на «Ц»? Результатом этого стало смещение СП-41 на юго-восток во второй половине 2023 года и генеральный северо-восточный дрейф СП-42 с октября 2024 до сентября 2025 г.

Исследования структуры водных масс вдоль маршрута дрейфа

С борта ЛСП



Глубоководное термохалинное профилирование с борта ЛСП выполнялось от поверхности до дна СТД-профилографам **SeaBird SBE19plus** с временной дискретностью ~ 5 суток. Одновременно с профилированием выполнялся пробоотбор на выбранных (~ 24) горизонтах с последующим производством гидрохимических определений.

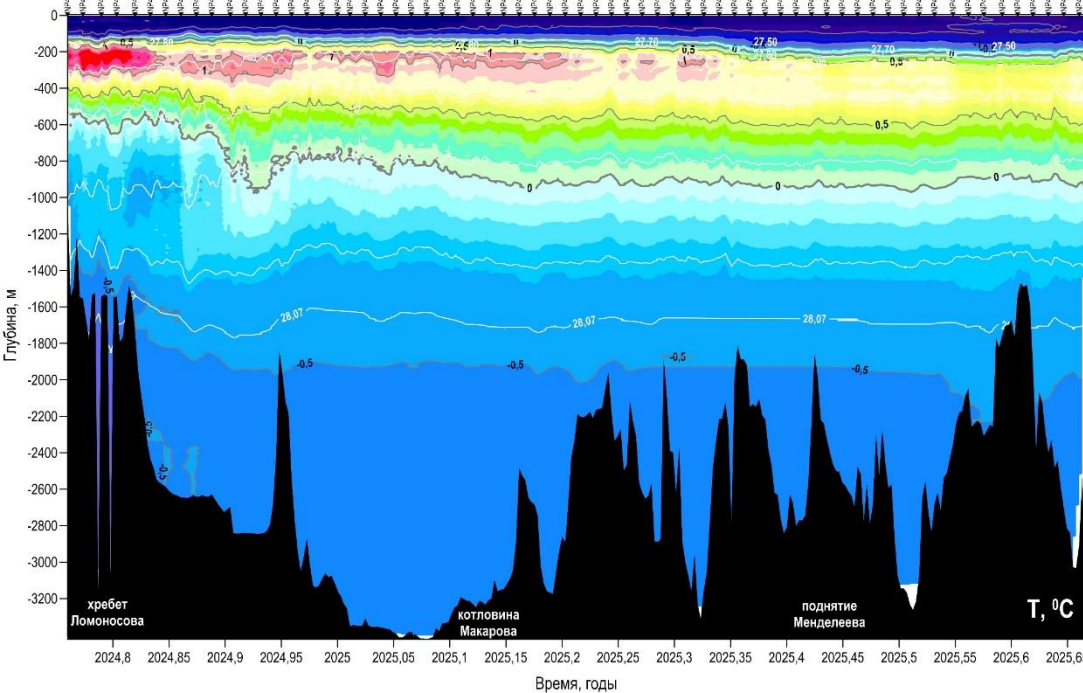
Из ПДКО



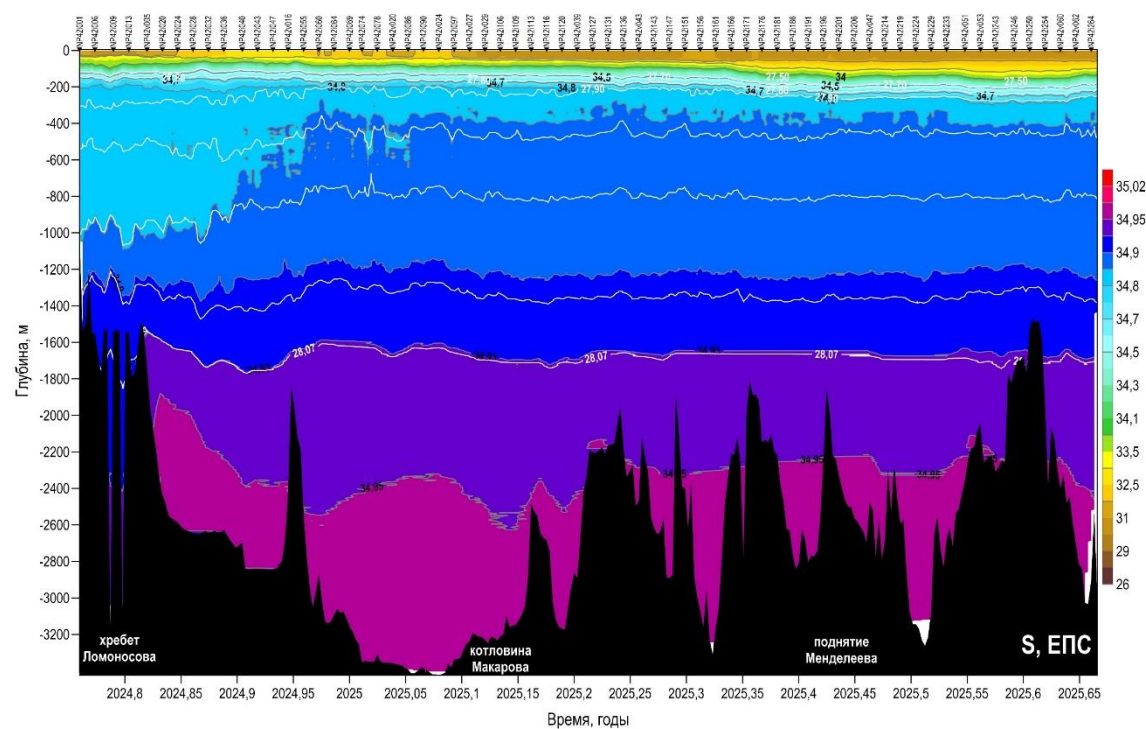
Термохалинное профилирование из ПДКО СТД-зондом **SBE19plus** выполнялось **ежедневно** в слое до 1500 метров.

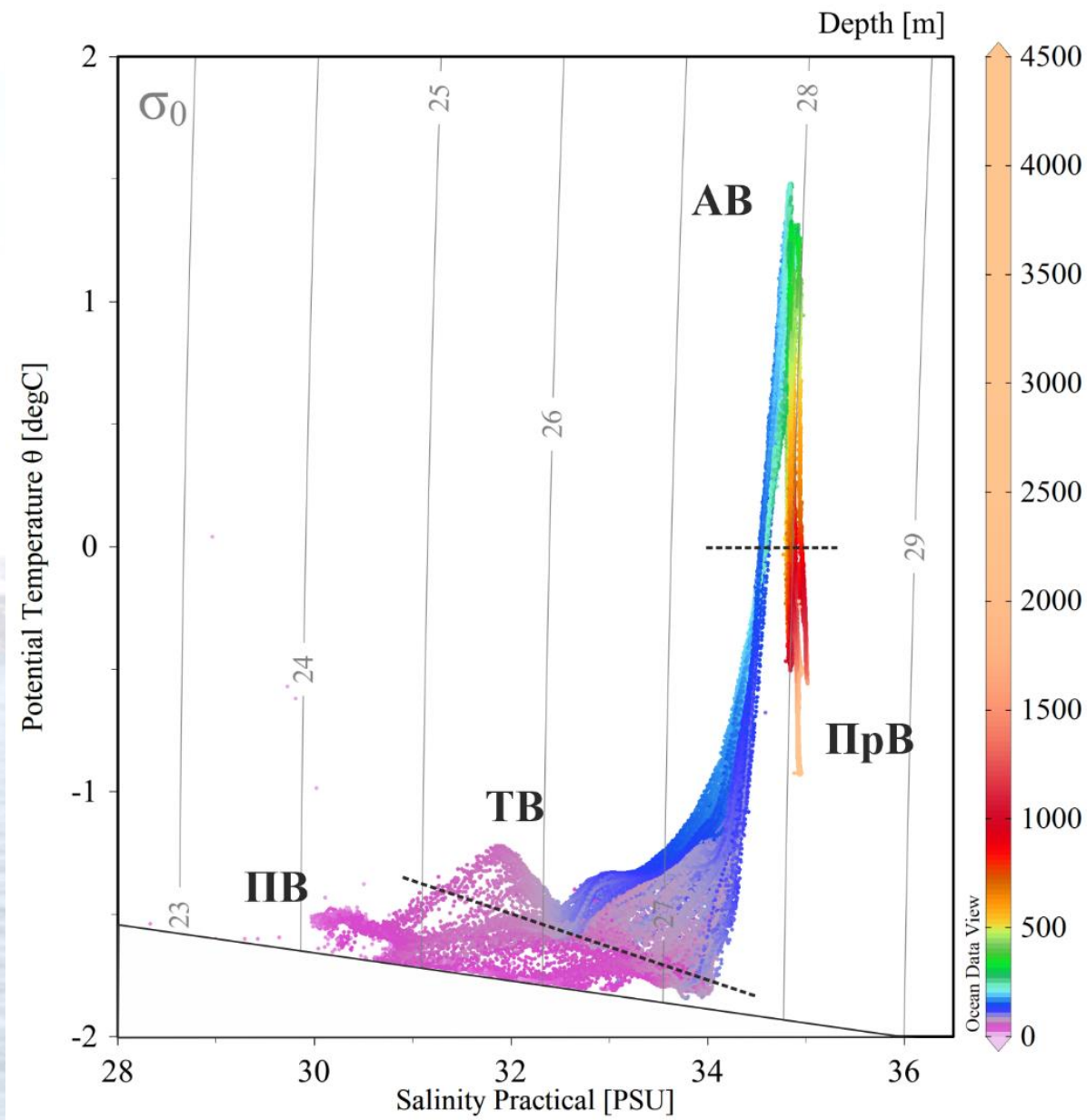
Временное распределение температуры и солёности воды вдоль траектории дрейфа «СП-42»

По распределениям температуры и солёности выделяются основные водные массы, характерные для районов дрейфа: распресненный верхний квазиоднородный слой с температурой около точки заморзания, пикноклин, атлантическая вода (АВ) с положительной температурой, глубинная и донная воды.



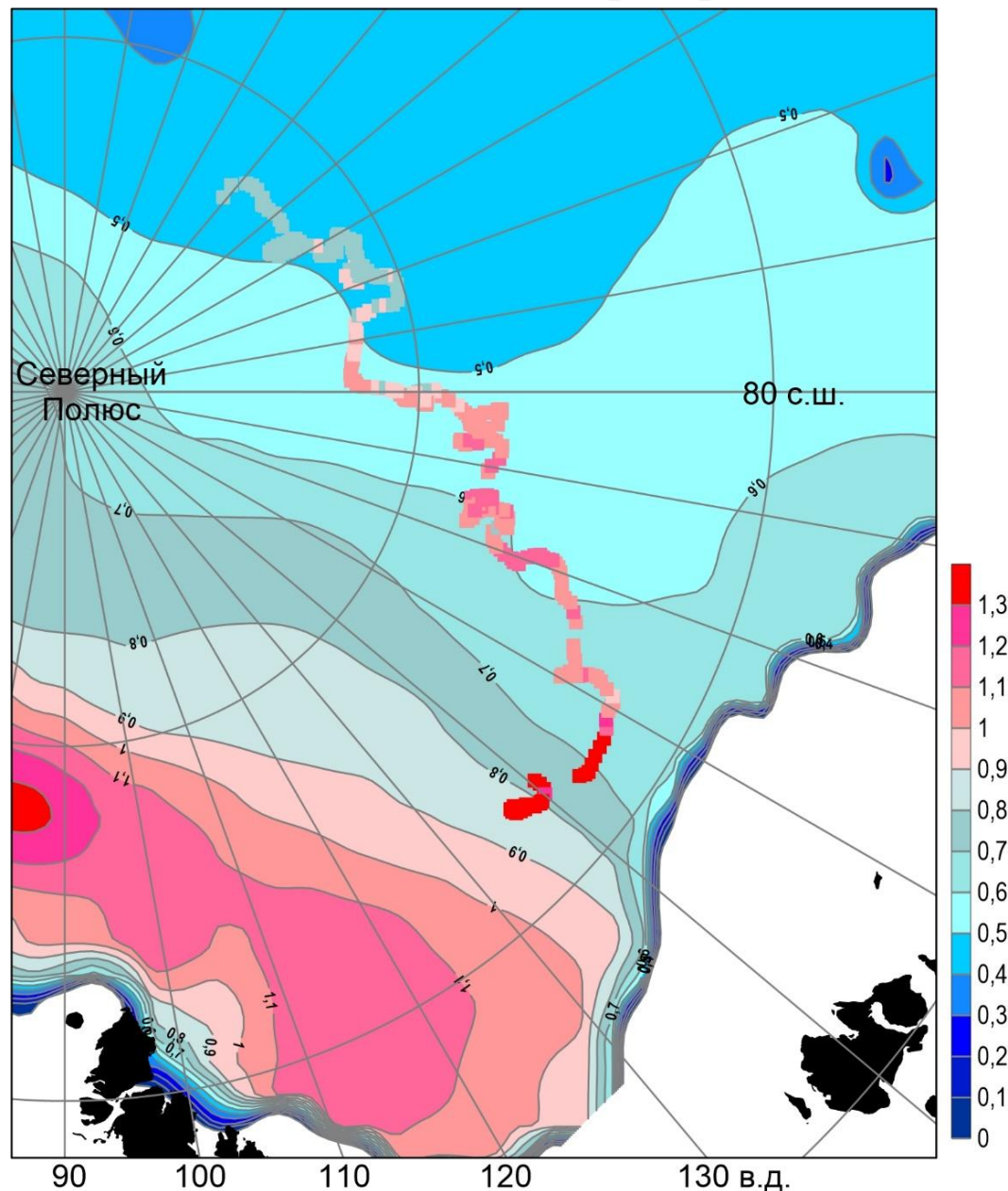
Во время дрейфа ЛСП отмечена аномально низкая солёность в нижней части АВ в окрестности хребта Ломоносова, не наблюдавшаяся далее по маршруту дрейфа.





TS—диаграмма, построенная по данным вертикального зондирования за весь период экспедиции СП-42.
 ПВ – арктическая поверхностная водная масса; ТВ – тихоокеанская промежуточная водная масса; АВ – атлантическая глубинная водная масса; ПрВ – придонная водная масса

Распределение максимальной температуры воды вдоль траектории дрейфа «СП-42»



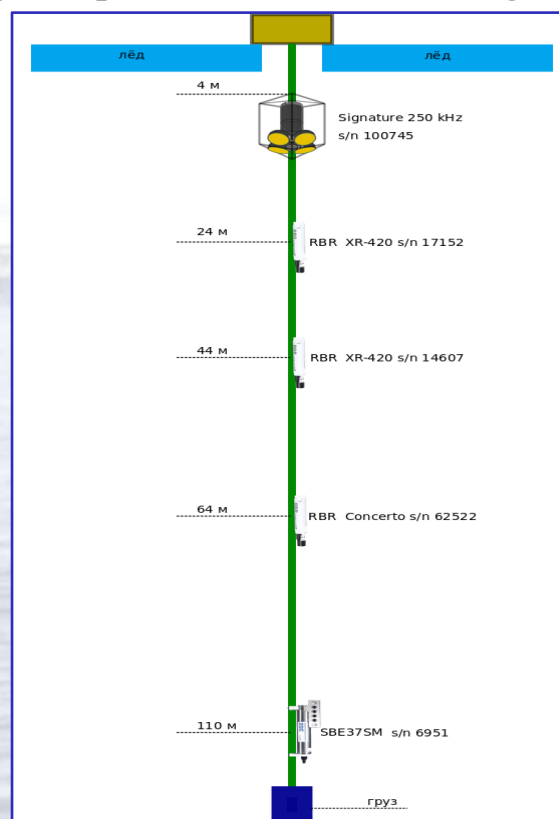
Температура в теплом ядре глубинных вод атлантического происхождения (АВ) вдоль траектории дрейфа «СП-42» в среднем на 0.5°C превышает значения, характерные для второй половины 20-го века [Атлас СЛО], что говорит о том, что потепление АВ начавшееся на границе СЛО с Северной Атлантикой в начале 1990-х гг. [Quadfasel et al., 1991] и усилившееся в 2000 – 2010-е годы [Polyakov et al., 2020], распространилось до глубоководных котловин амеразийской Арктики.

Исследования послойной изменчивости параметров течений

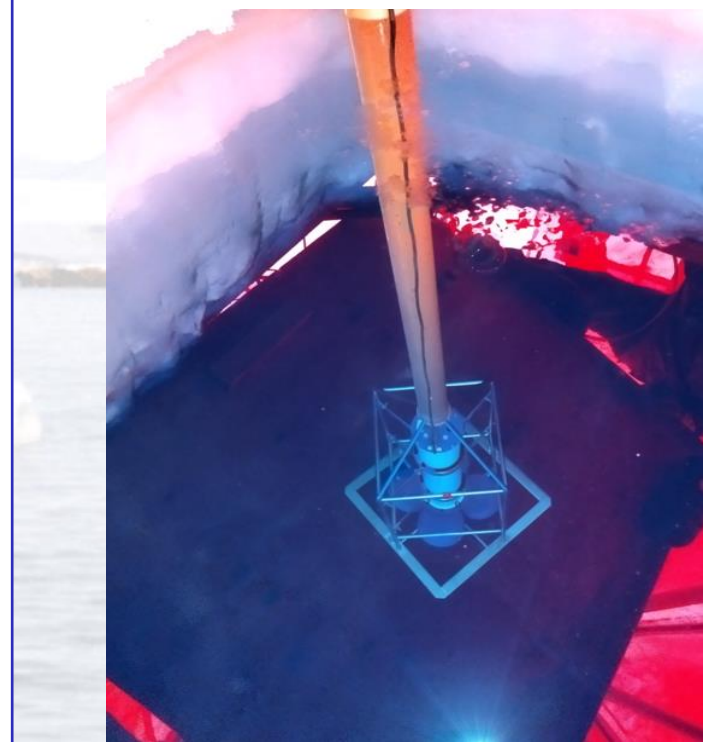
Исследование структуры поля плотности подледного слоя проводилось с помощью **CTD–регистраторов RBR Concerto**. Приборы устанавливались под лед на горизонтах 2 и 5 метрах с дискретностью измерений 1 минута. Для выявления структуры поля течений подледного слоя в непосредственной близости к CTD регистраторам RBR Concerto3 размещался акустический доплеровский профилограф параметров течений **Nortek Signature 1000**



Установка CTD–регистраторов RBR Concerto3 под лед в необогреваемую майну

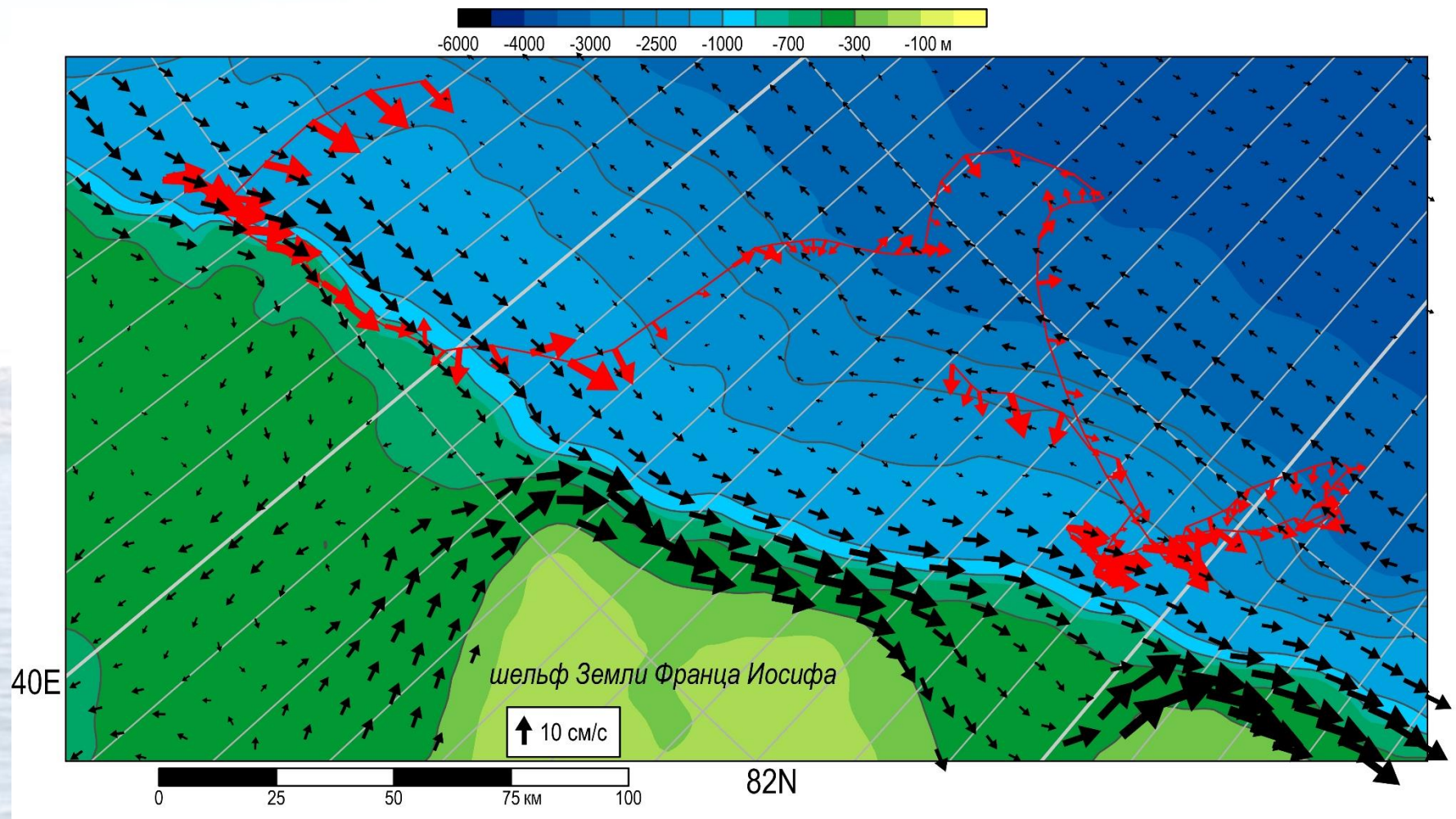


Измерительный комплекс послойной изменчивости параметров течений



Постановка профилографа течений WHLR75 ориентированным по курсу судна

Распределение скорости течения в ядре атлантической воды к северу от архипелага Земля Франца Иосифа



Красные стрелки – измерения ADCP Nortek Signature 250 в экспедиции СП-41

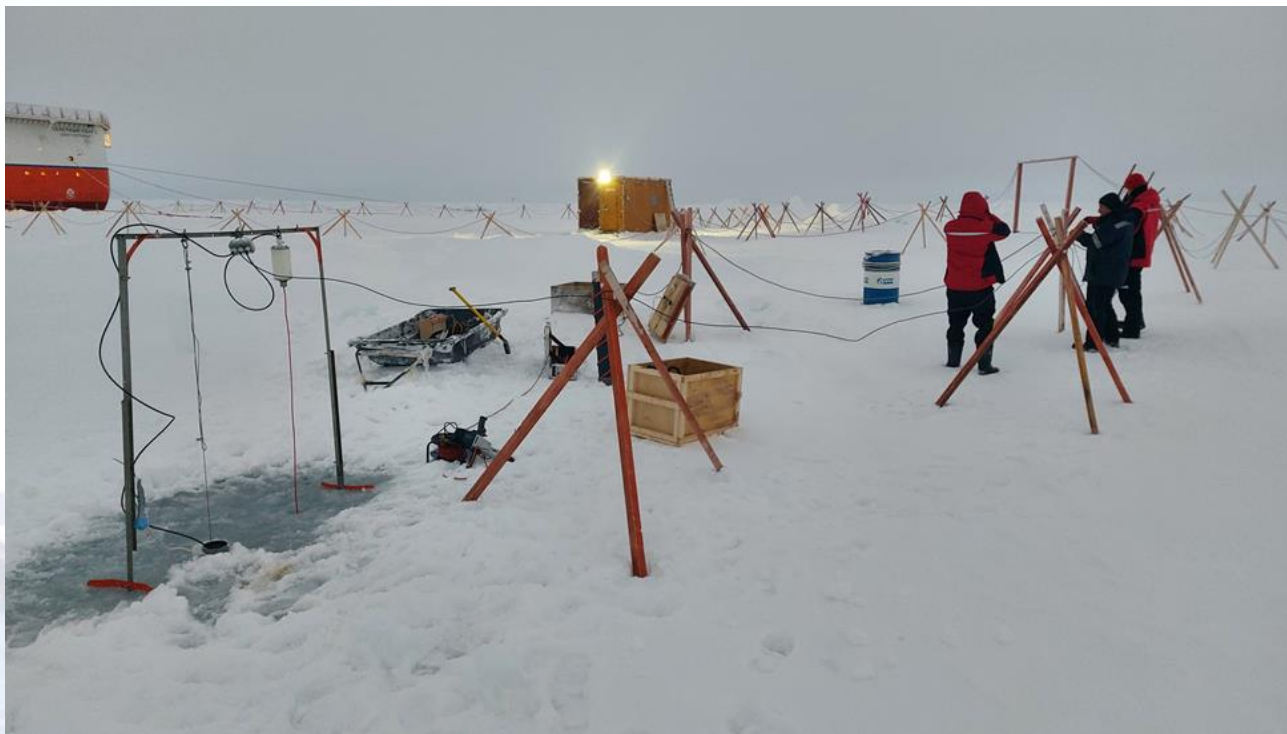
Черные стрелки – средние значения по реанализу GLORYS12V1 на интервале 1993 – 2025

Работа турбулиметром Sea & Sun MSS90 в палатке
океанографического терминала



Регистрация параметров микропульсаций и определение скорости диссипации турбулентной энергии, а также термохалинных характеристик в слое от поверхности до 400 – 450 м выполнялась с использованием турбулиметра **Sea & Sun Technology MSS90**.

Исследование термических процессов в ледяном покрове и поверхностном слое вод

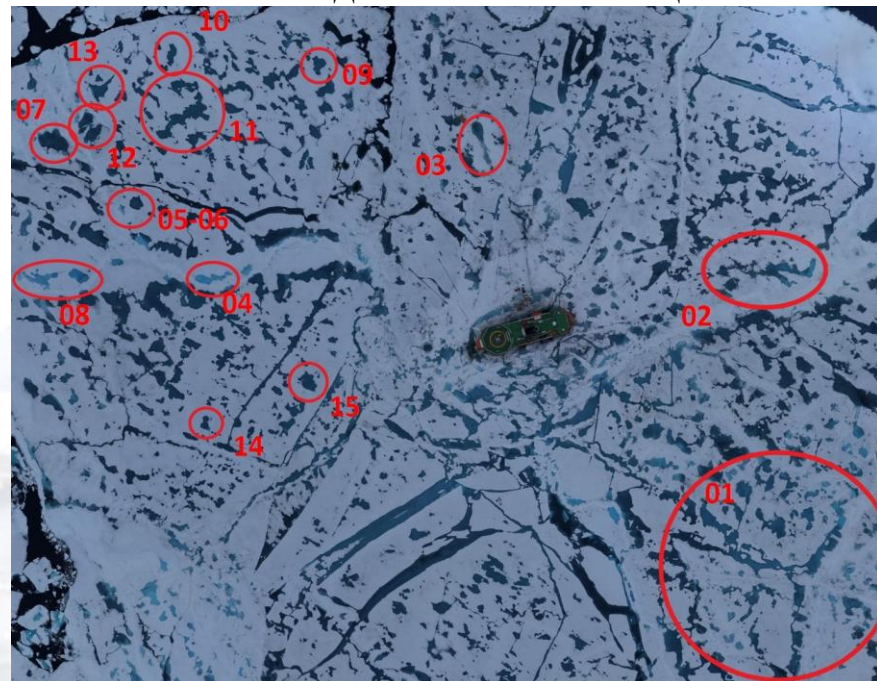


Для изучения синоптической и мезомасштабная изменчивости в поверхностном слое вод устанавливалась термопрофилирующая измерительная система **TrABoat** Морского гидрофизического института РАН (МГИ РАН). Измерительная система представляет собой термочувствительный кабель–датчик длиной 4.8 метра – 16 участков по 0.3 метра, предназначенного для вмораживания в лед (далее – ледовая термокоса), кабель–датчик длиной 45 метров – 15 участков по 3 метра, погружаемого под лед (далее – морская термокоса), блока электроники для каждой из термокос. На конце морской косы расположен датчик гидростатического давления. Питание и связь с системой осуществляется через соединительный кабель. Регистрация и обработка данных системы производится в телеметрическом режиме с помощью специализированного программного обеспечения. Дискретность измерений 1 секунда.

Схематичное изображение эксперимента в вертикальном сечении



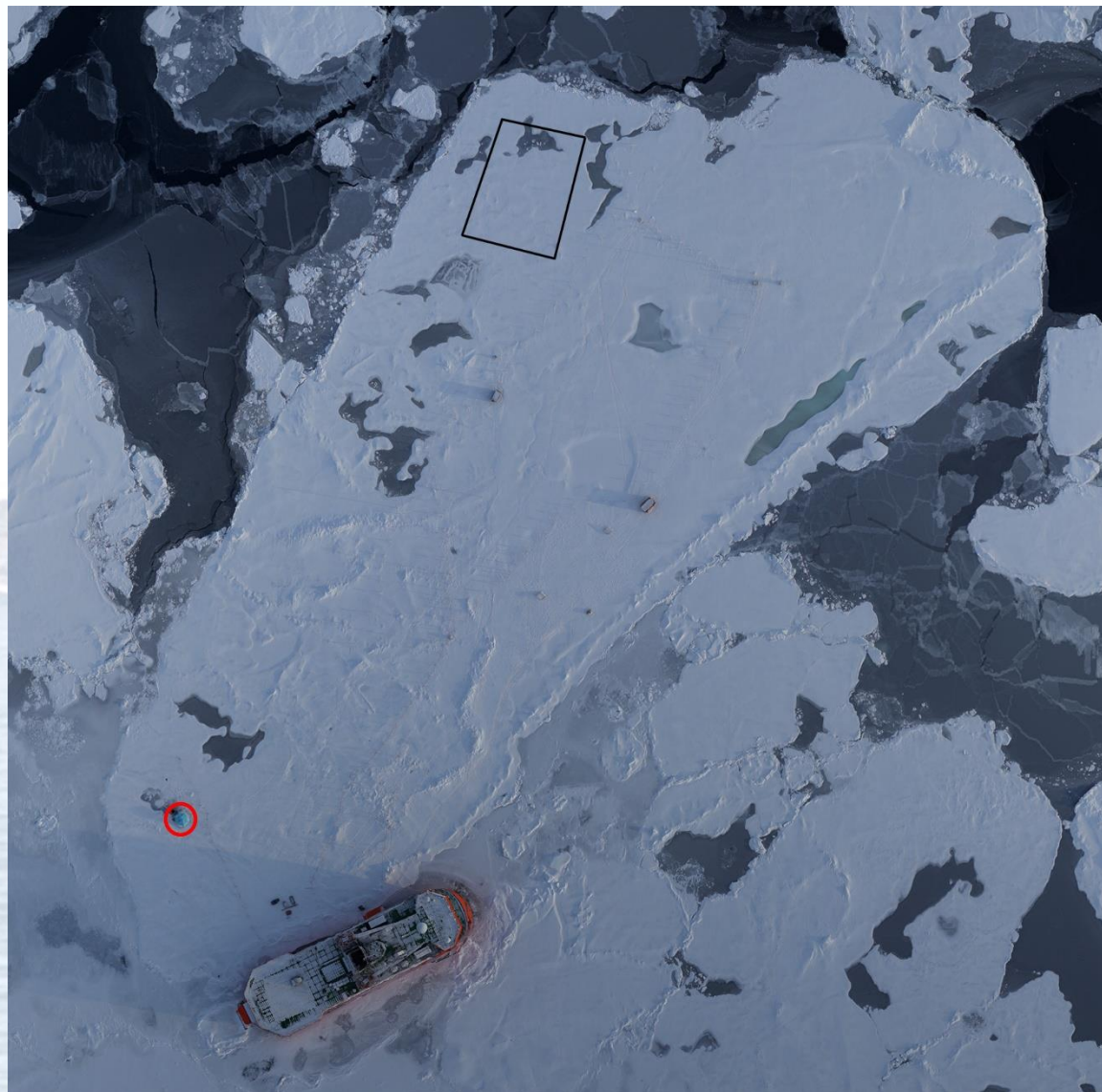
Пространственное положение исследованных снежниц



Эксперименты проводились с целью воспроизведения наблюдающегося в природе явления стекания талой пресной воды с поверхности припайного льда сквозь дренажные отверстия естественного происхождения, возникающего при сквозном протаивании снежниц, а также, в значительно больших масштабах, при растекании речных паводковых вод по поверхности припая на мелководных морских акваториях, граничащих с устьевыми участками.



Для проведения интеркалибрации приборы фиксировались на защитной раме судового океанографического комплекса таким образом, чтобы датчики всех приборов располагались на одном горизонте. Измерители предварительно синхронизировались по времени. После стандартного выдерживания комплекса в подповерхностном слое для стабилизации показаний приборов, выполнялось зондирование от поверхности до глубины 500 метров.



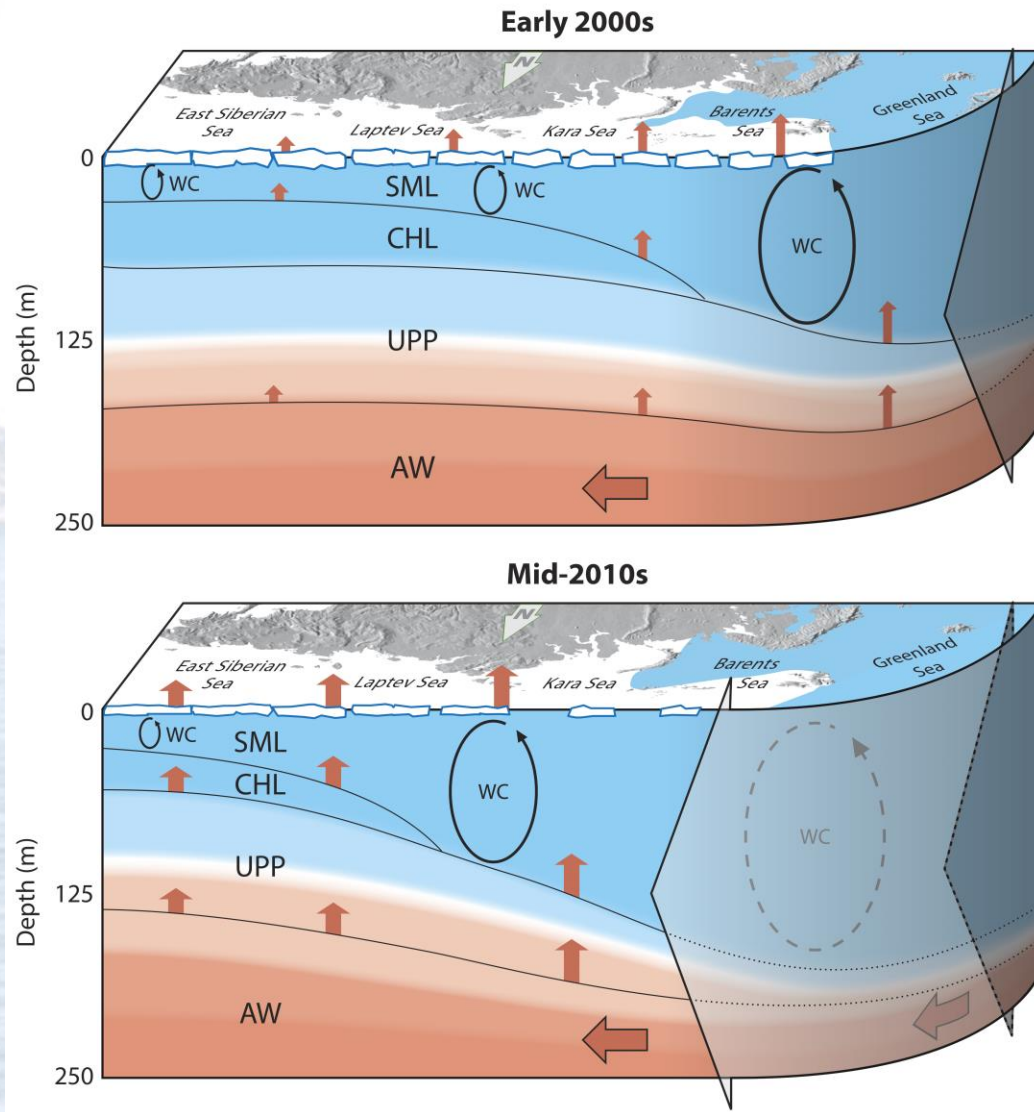
Контактные измерения толщины ровного двухлетнего льда выполнялись на полигоне, расположенном на удалении около 250 м от судна. Из-за небольшого размера льдины размер полигона составлял 30 × 40 м (5 профилей через 10 м, по 7 точек через 5 м на каждом профиле). Точность измерений ± 1 см. Общее количество точек 35.

Расположение измерительного ледового полигона (черный прямоугольник) и океанологического терминала (красный круг) в экспедиции СП-41

СОДЕРЖАНИЕ

- Введение (краткая история ЛСН)
- Ледостойкая Самостоятельная Экспедиция (ЛСЭ): наука и жизнь
- Океанологические исследования на ЛСЭ: задачи и их решение
- Некоторые предварительные результаты
- **Атлантификация бассейна Нансена по данным прямых измерений**
- Заключение (перспективы дальнейшего использования ЛСЭ)

Атлантификация» бассейна Нансена



Атлантификация –
возрастание влияния тепла
промежуточных вод
атлантического
происхождения на ледяной
покров СЛО

[Иванов и Аксенов, 2013]

[Polyakov, ..., Ivanov et al., 2017]

Распределение температуры в верхнем 100-метровом слое вдоль траектории дрейфа СП-41

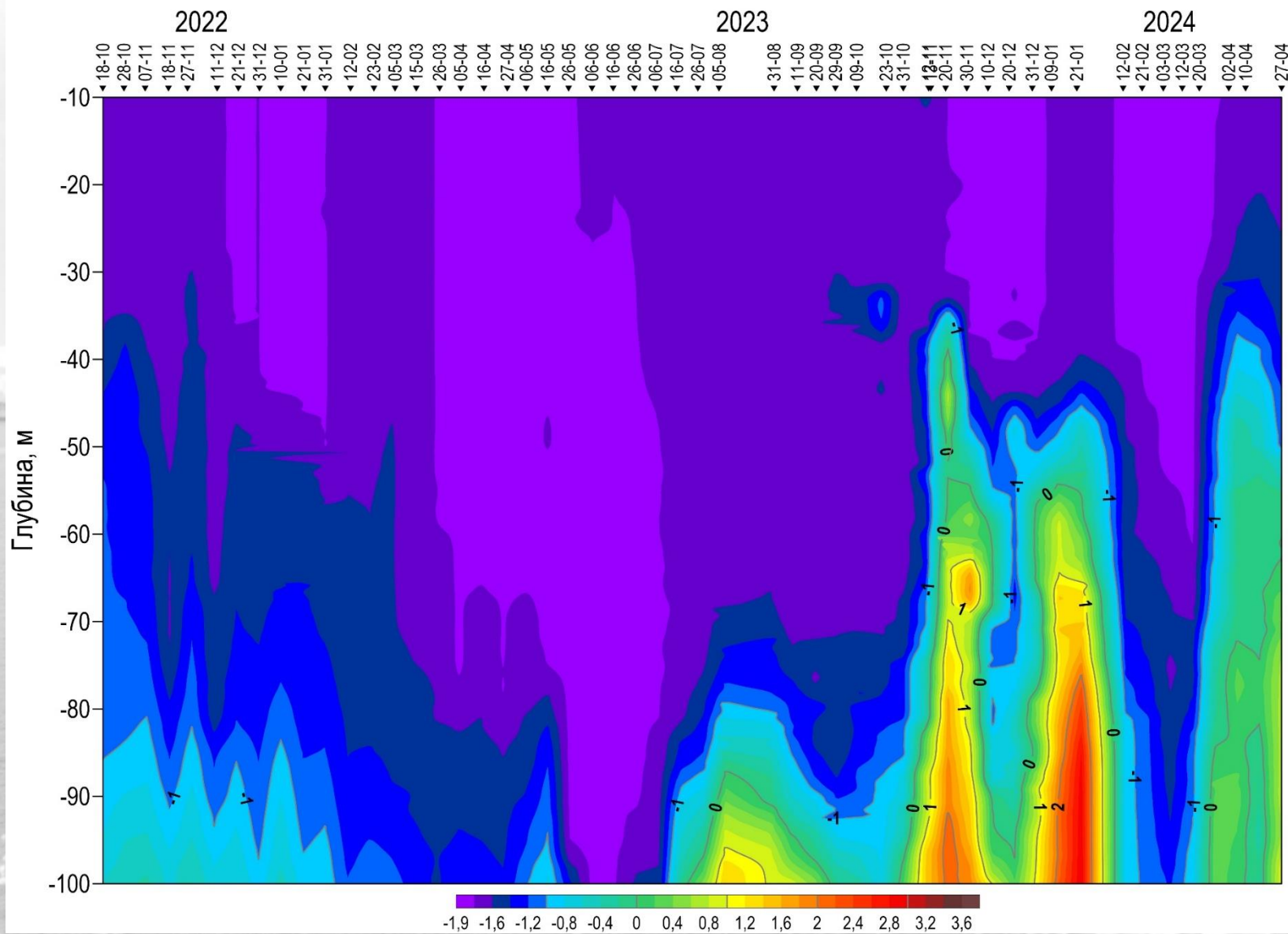
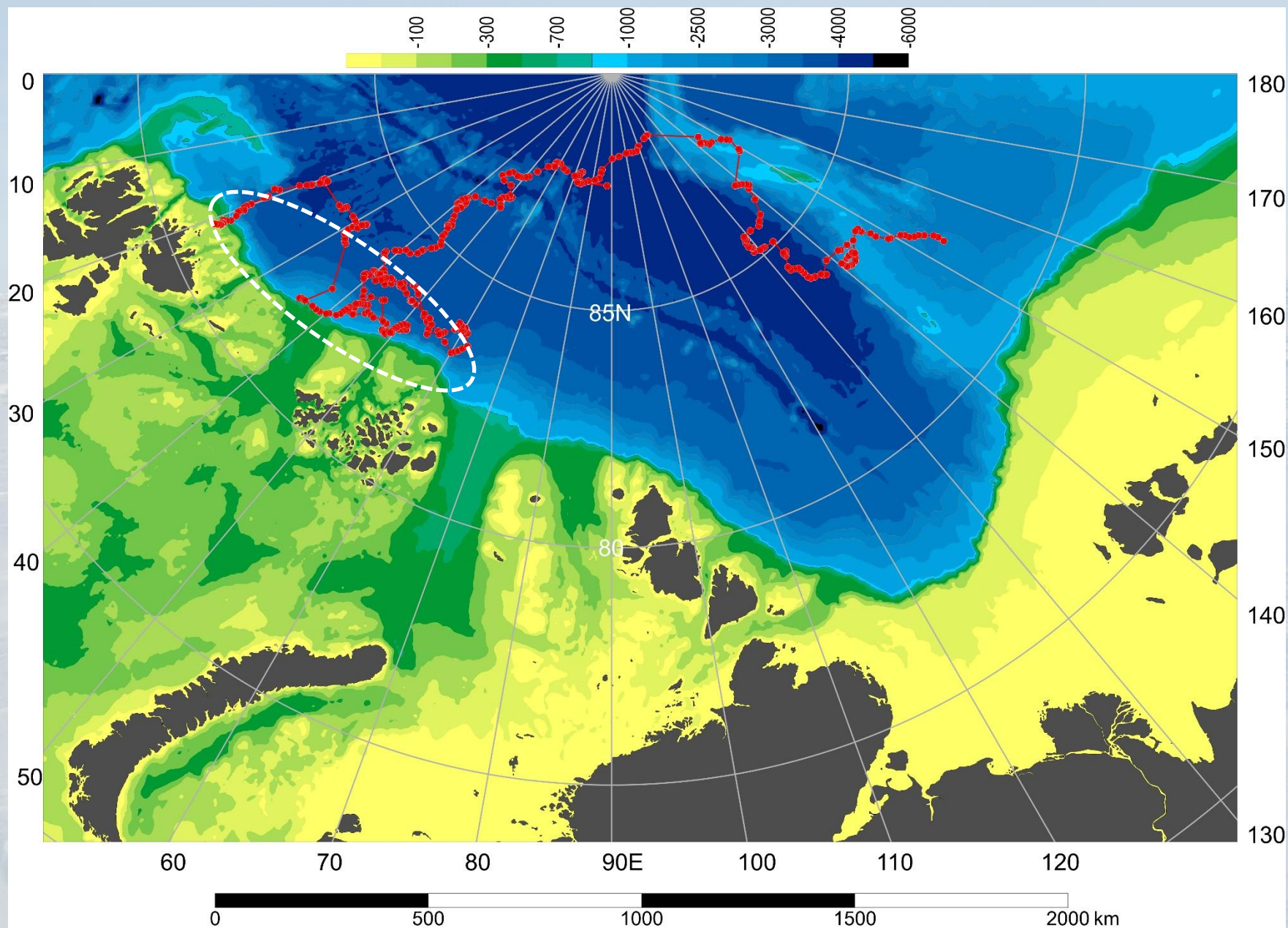
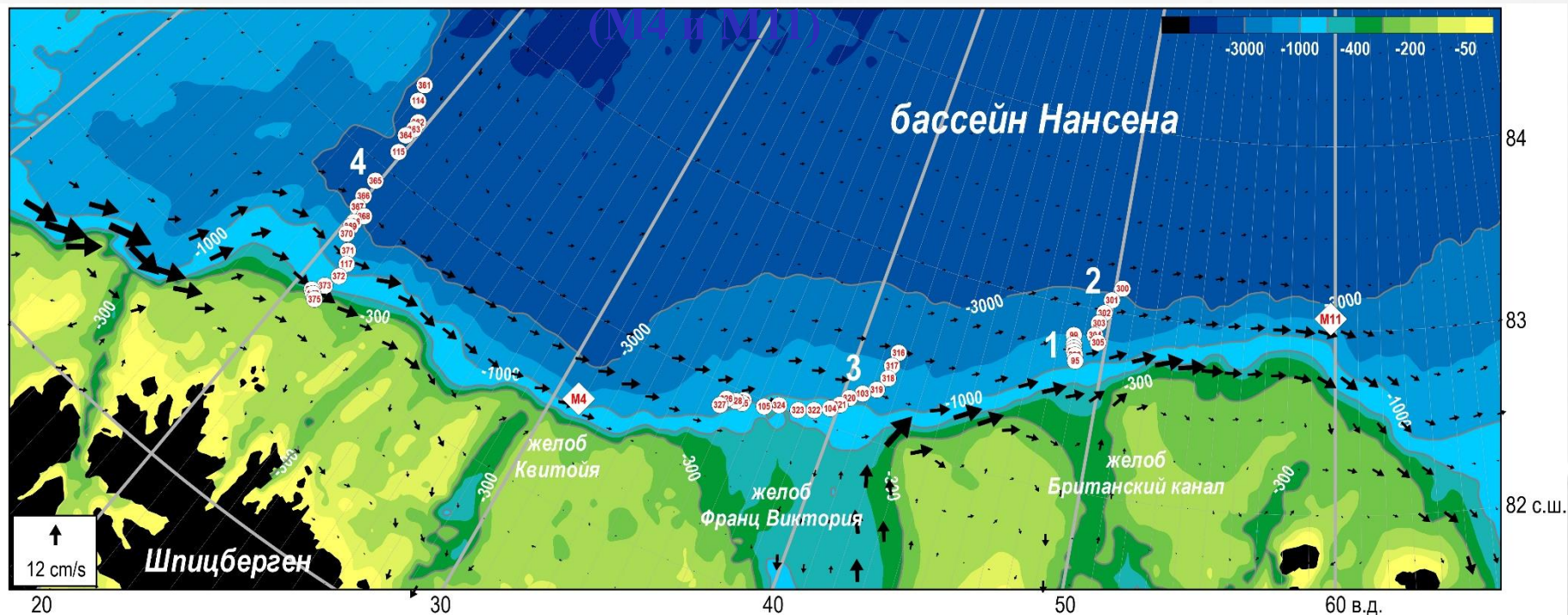


Схема дрейфа СП-41

Атлантификация



Расположение STD-станций на разрезах СП-41 и долговременных автономных буйковых станций (АБС) *NABOS*



Время выполнения разрезов:

Разрез 1: 29.11 – 02.12.23

Разрез 2: 20.12 – 25.12.23

Разрез 3: 11.01 – 25.01.24

Разрез 4: 20.03 – 01.04.24

Время постановки АБС:

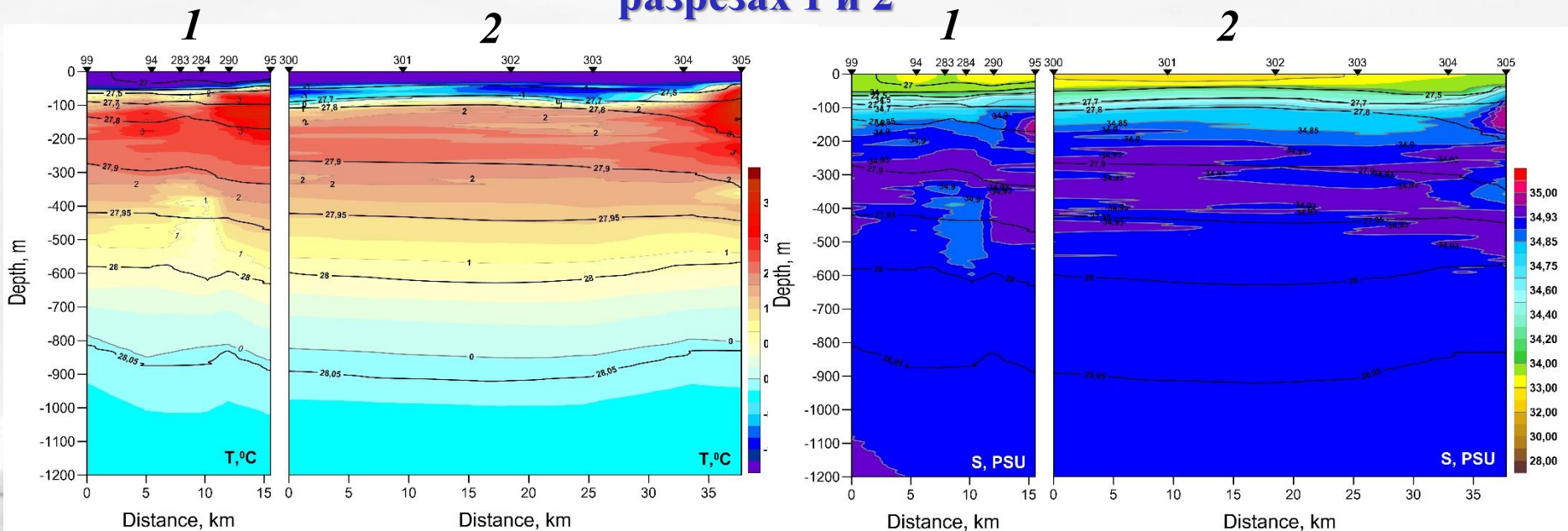
М4: 09.2004 – 10.2008

09.2009 – 09.2010

М11: 10.2008 – 09.2011

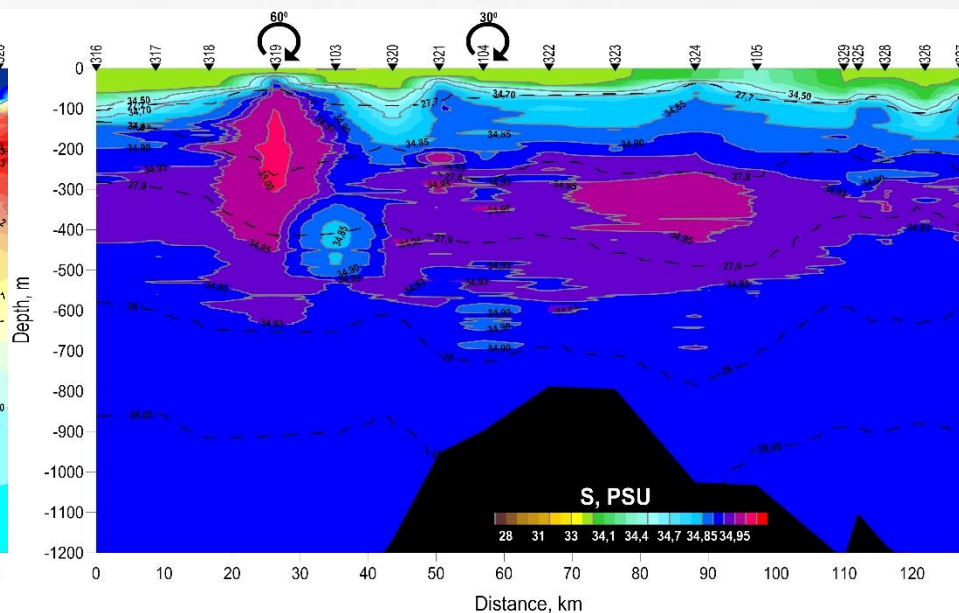
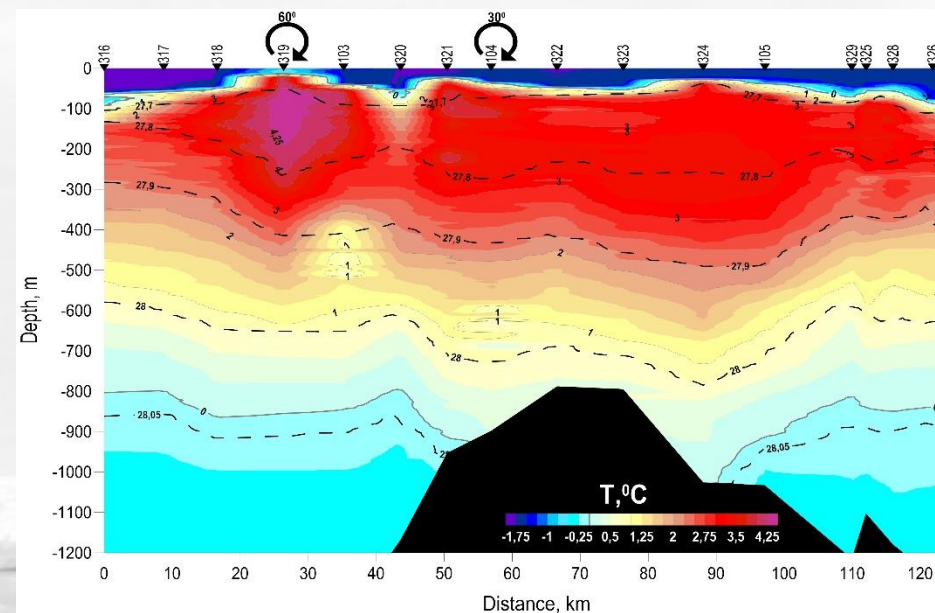
Векторы средней (1994 – 2023) скорости течения в слое 150 – 500 м по данным реанализа ORAS5 (CMEMS) показаны стрелками

Распределение температуры (слева) и солёности (справа) на разрезах 1 и 2



Разница между временем выполнения разрезов 1 и 2 составляет 21 ± 3 сут. При расстоянии между ст. 95 и ст. 305 17 км, для того, чтобы теплое ядро атлантической воды (АВ) сместилось за это время от разреза 1 до разреза 2, его скорость должна быть менее 1 см/с. Средняя скорость течения между разрезами 1 и 2 в несколько раз больше (5 – 7 см/с, согласно данным реанализа). Кроме того, если предположить, что АВ на разрезе 1 и на разрезе 2 – одна и та же, то из этого будет следовать, что ее температура каким-то образом возросла при перемещении вниз по потоку АПТ.

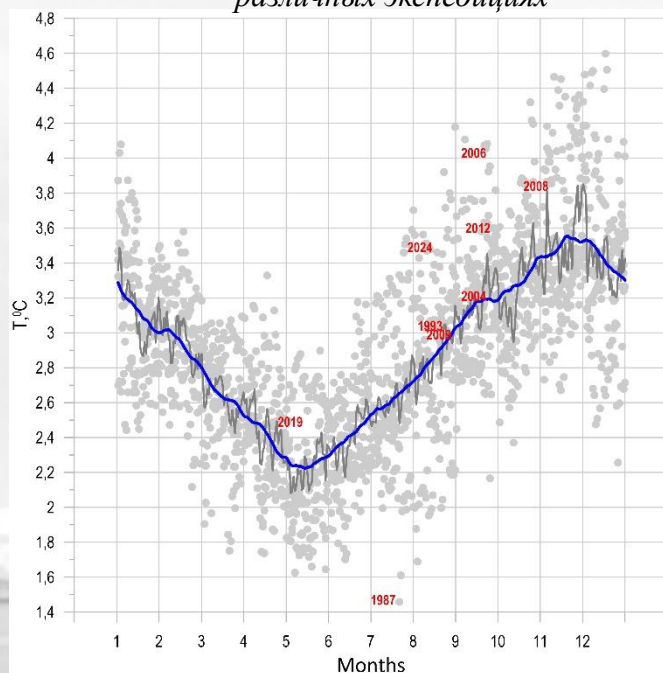
Распределение температуры (слева) и солёности (справа) на разрезе 3



Гипотеза 1: разрез 3 пересекает ядро АВ на ст. 321. Все станции к западу от нее находятся достаточно близко к ядру, но южнее и не захватывают само ядро, находящееся напротив устья желоба Франц Виктория между изобатами 1200 – 1500 м. Характерное распределение потенциальной плотности на ст. 317 – 320, а также абсолютные максимумы температуры и солёности на ст. 319, указывают на то, что эта станция попала в центр обособленного антициклонического вихря («линзы»), ранее отделившейся от «материнского» ядра АВ выше по потоку Арктического пограничного течения (АПТ).

Внутригодовые изменения температуры на АБС М4 на глубине 200 м. Серые точки – суточные значения, синяя линия – скользящее среднее с «окном» 1 мес. Красных цифры измерения в различных экспедициях

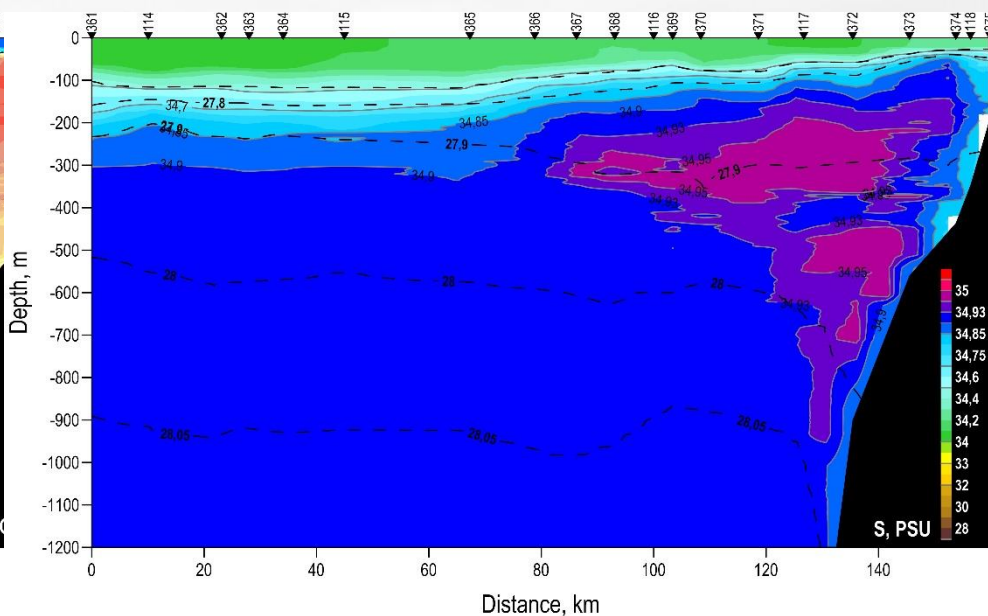
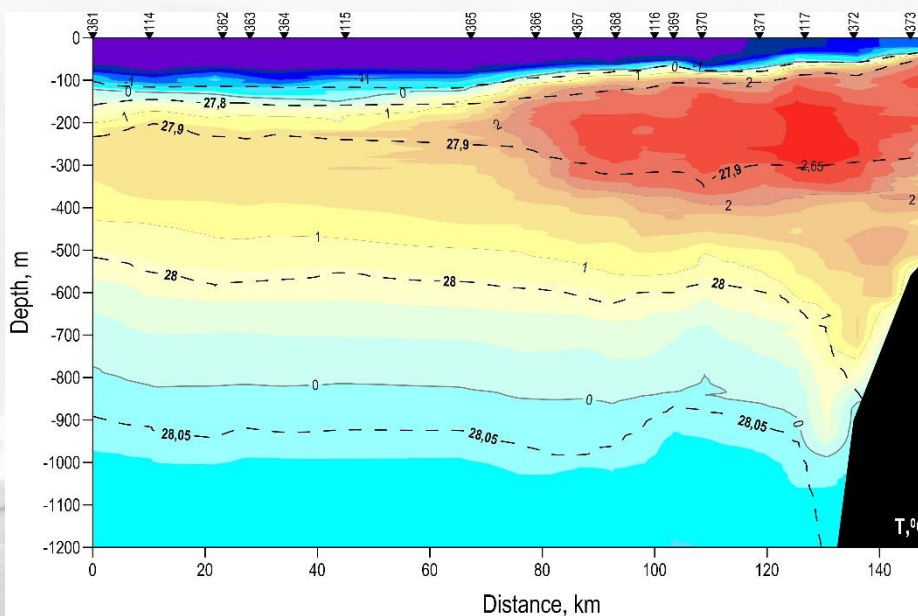
Сезонные колебания температуры АВ в бассейне Нансена



В начале 2000-х гг. с появлением возможности осуществления продолжительных непрерывных измерений на автономных буйковых станциях (АБС) под сплошным ледяным покровом, стало известно, что температура и соленость АВ в бассейне Нансена подвержены значительным сезонным изменениям. С учетом сдвига фазы температурного сигнала в северной части пролива Фрама и на меридиане 31°с.ш. в бассейне Нансена было предположено, что эти изменения не генерируются локально, а переносятся Арктическим пограничным течением (АПТ) в виде термохалинных аномалий из района их зарождения – круглогодично свободной ото льда северной части пролива Фрама, что было позднее подтверждено измерениями на АБС в других районах в бассейне Нансена и математическим моделированием.

Гипотеза 2: Максимальные значения температуры и солености были достигнуты в конце ноября 2023 г. в районе разреза 3. На выполненном в этот момент времени разрезе 1 температура и соленость уже были повышенными, но еще не достигли пиковых значений. В конце декабря фронт сезонной «тепловой волны» прошел через разрез 2, где на ст. 305 были измерены температура и соленость, близкие к абсолютному максимуму. Во время проведения измерений на разрезе 3 (в январе 2024 г.) температура и соленость на этом разрезе начали уменьшаться. При этом, максимальные (или очень близкие к максимальным?) значения «законсервировались» в линзе, которая, вероятнее всего, образовалась в динамически-активной зоне выноса вод из желоба Франц Виктория.

Распределение температуры (слева) и солёности (справа) на разрезе 4



В гипотезу 2 вполне вписывается распределение термохалинных характеристик на самом западном разрезе 4. Временной сдвиг между разрезами 4 и 3 составляет 2 месяца. Разница между максимальными температурами в ядре АВ на этих разрезах находится в диапазоне от 1.32 до 1.72°C (если принять за абсолютный максимум температуру в линзе). Это различие показывает масштаб сезонных изменений температуры в ядре АВ в западной части бассейна Нансена.

Записи температуры воды на АБС М4 и М11

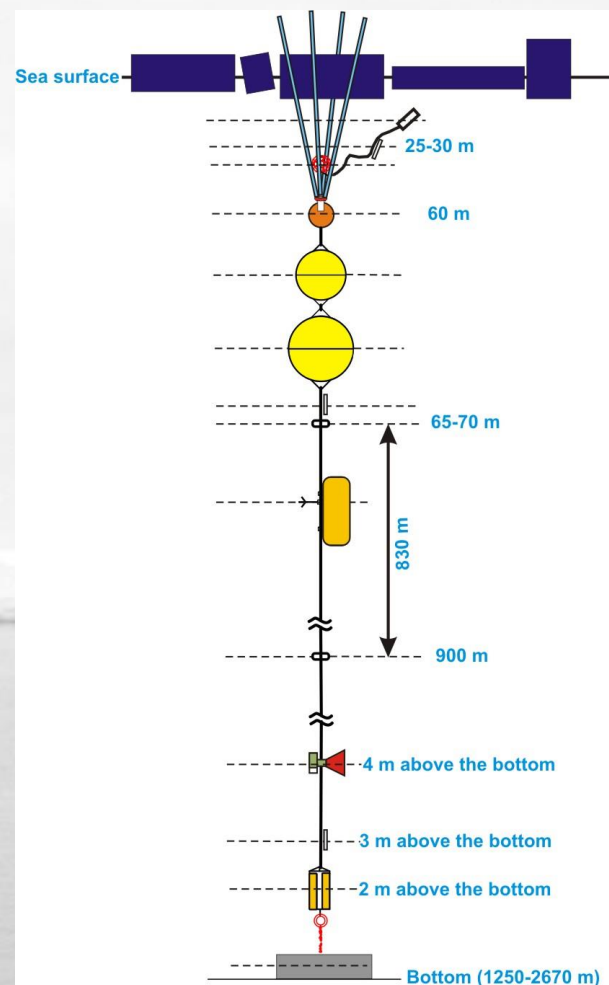
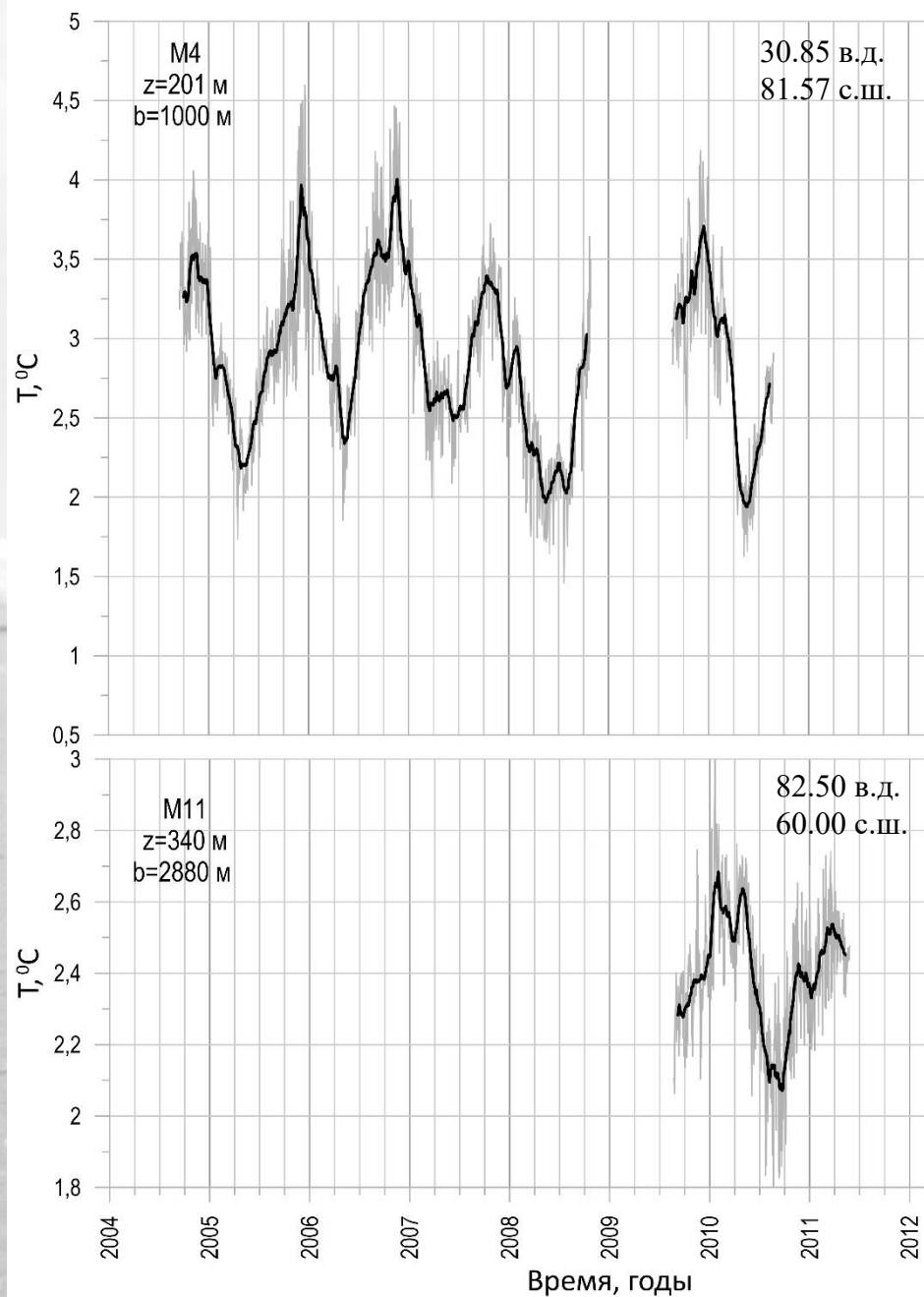


Схема автономной
буйковой станции
(АБС) NABOS

Записи температуры воды на АБС М4 и М11

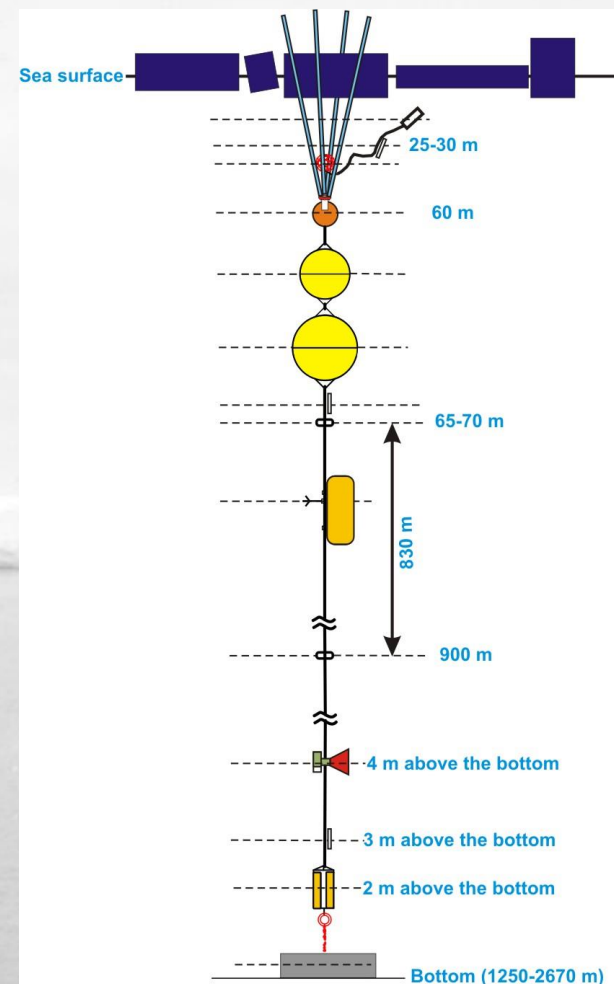
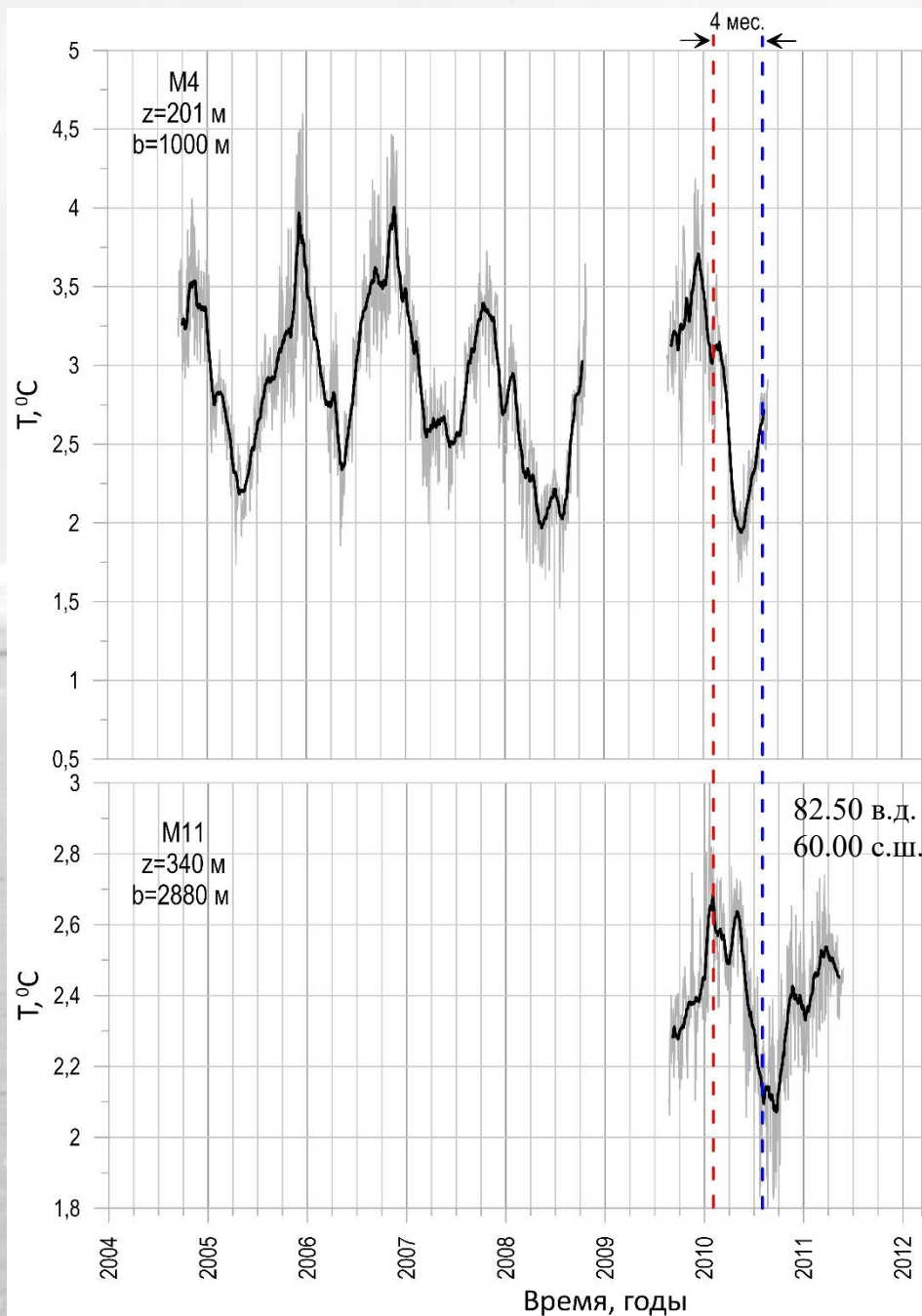
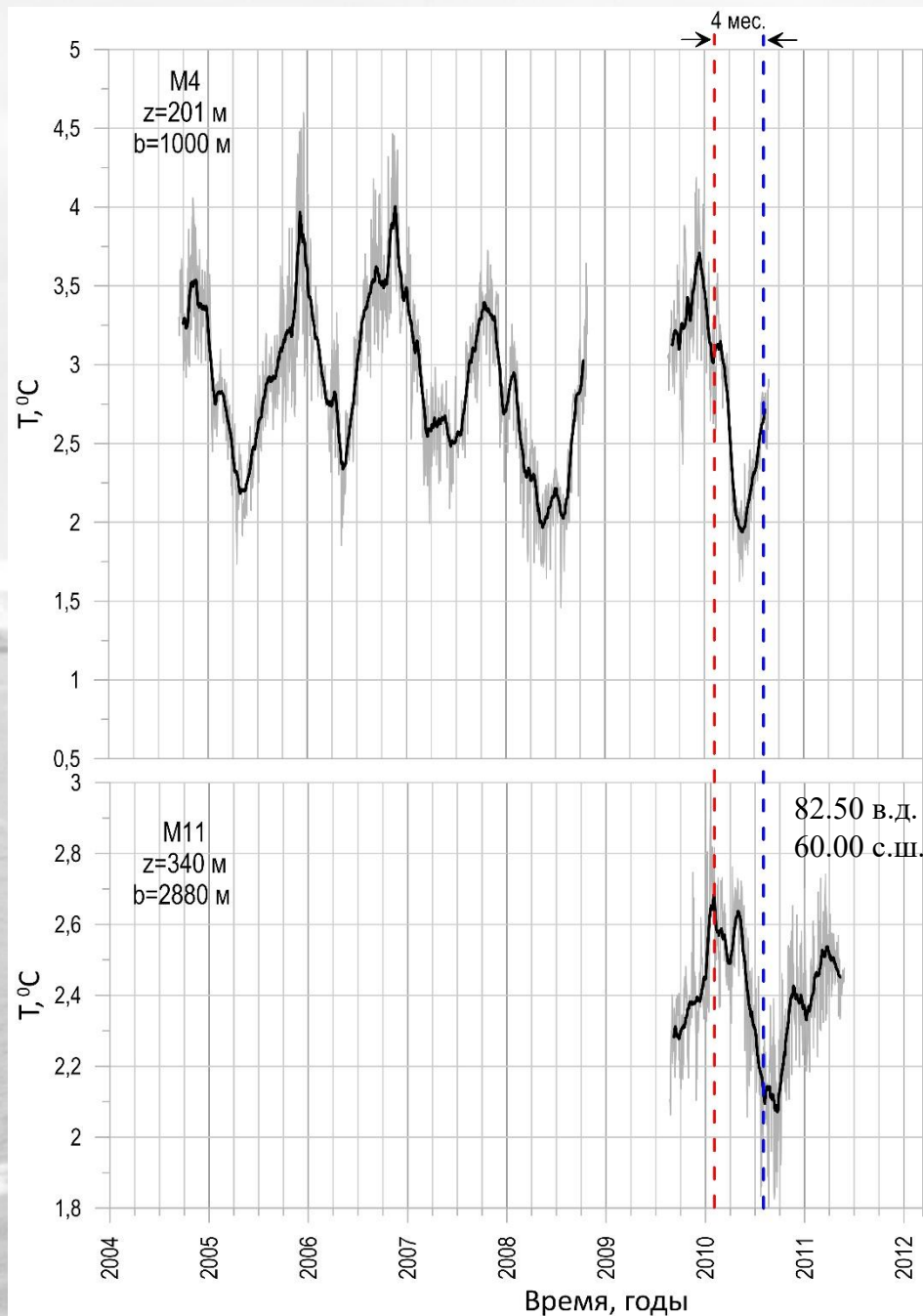
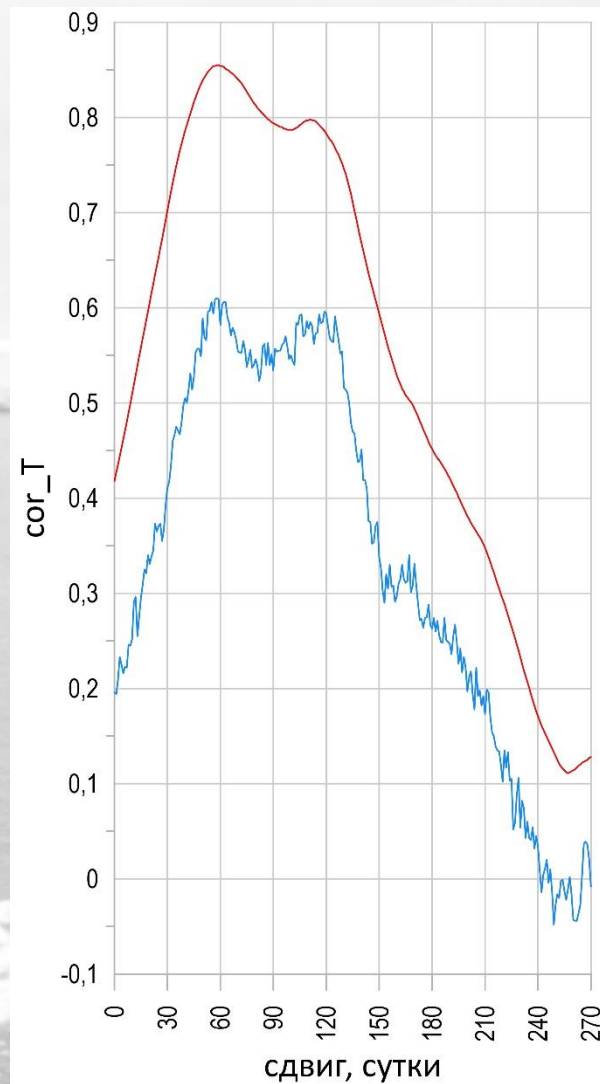


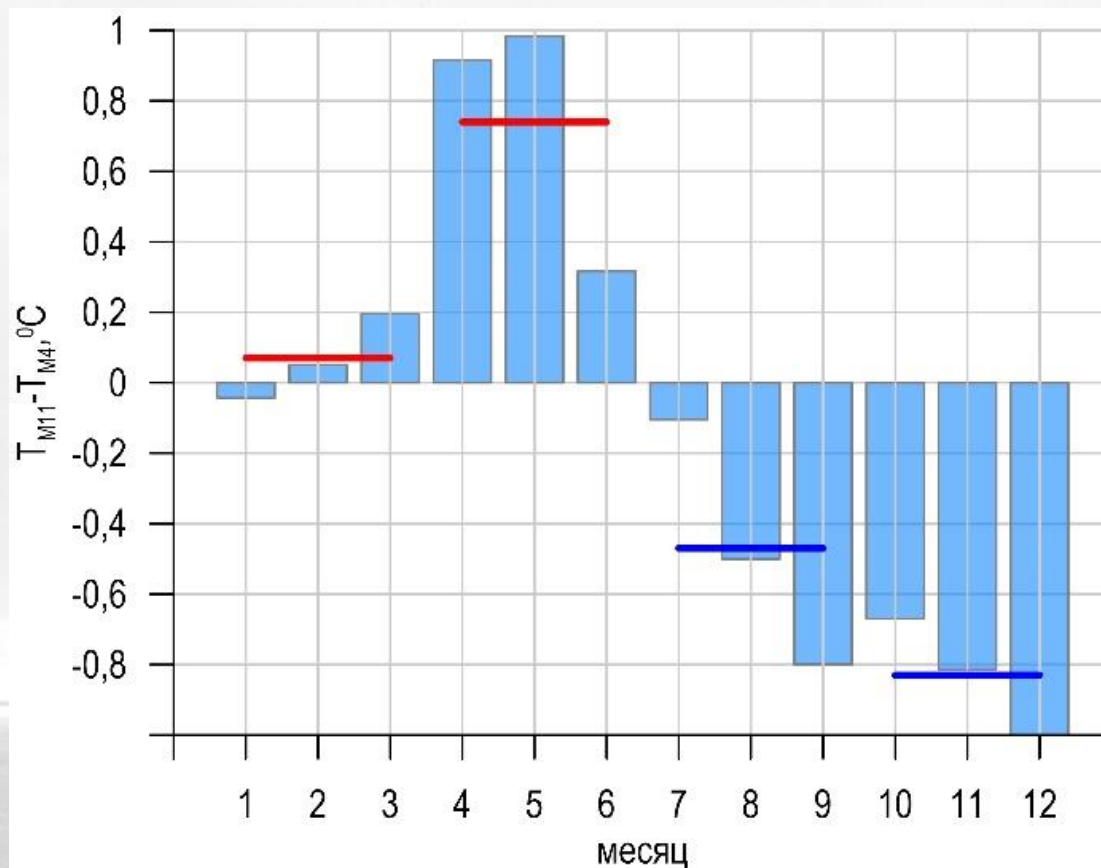
Схема автономной
 буйковой станции
 (АБС) NABOS

Записи температуры воды на АБС М4 и М11



Коэффициент парной
корреляции между рядами
температуры (красный) и
солёности (синий) на М4 и
М11





В результате перемещения сезонной «тепловой волны», уменьшение температуры происходит в летний и осенний сезоны, тогда как зимой и весной наблюдается ее рост. Выявленная закономерность вполне объясняет возрастание максимальной температуры в ядре АВ между разрезами 4 и 3, разницей во времени выполнения измерений на этих разрезах. Измерения на разрезе 3 выполнялись в первой половине января, когда температура к северу от ЗФИ была близка к сезонному максимуму (с учетом того, что разрез 3 расположен примерно посередине между М4 и М11). Измерения на разрезе 4 выполнялись в конце марта – начале апреля, когда температура в районе 20° в.д. была близка к сезонному минимуму (с учетом расстояния между разрезом 4 и АБС М4, и фазой сезонных колебаний на М4).

Температура воды на глубине 1 м над вертикальной осью линзы (ст. 319) равна -0.71°C , что на 1.15°C выше температуры замерзания ($T_f = -1.86^{\circ}$) при измеренной солёности 33.84 ЕПС. При средней скорости дрейфа на разрезе 3 (12.2 см/с), сдвиговая турбулентность создает крайне благоприятные предпосылки для подвода тепла из линзы непосредственно к нижней поверхности льда. Поток тепла (F_W) из океана к ледяному покрову рассчитывается по формуле (1) [McPhee, 1992]:

$$F_W = \rho c_p c_h u_* (T_0 - T_f) \quad (1)$$

$c_h = 0.0057$ – коэффициент теплопередачи, $u_* = W\sqrt{C_D}$ – скорость трения, W – скорость дрейфа льда относительно средней скорости течения на нижней границе экмановского слоя, $C_D = 0.0025 - 0.0035$ – коэффициент трения на границе лед – вода для района, прилегающего к северу к ЗФИ [Steiner, 2001], T_0 – температура воды на у нижней поверхности льда, T_f – температура замерзания морской воды при данной солёности, $\rho = 1028 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность морской воды, $c_p = 3970 \text{ Дж/кг/К}$ – удельная теплоемкость морской воды при постоянном давлении.

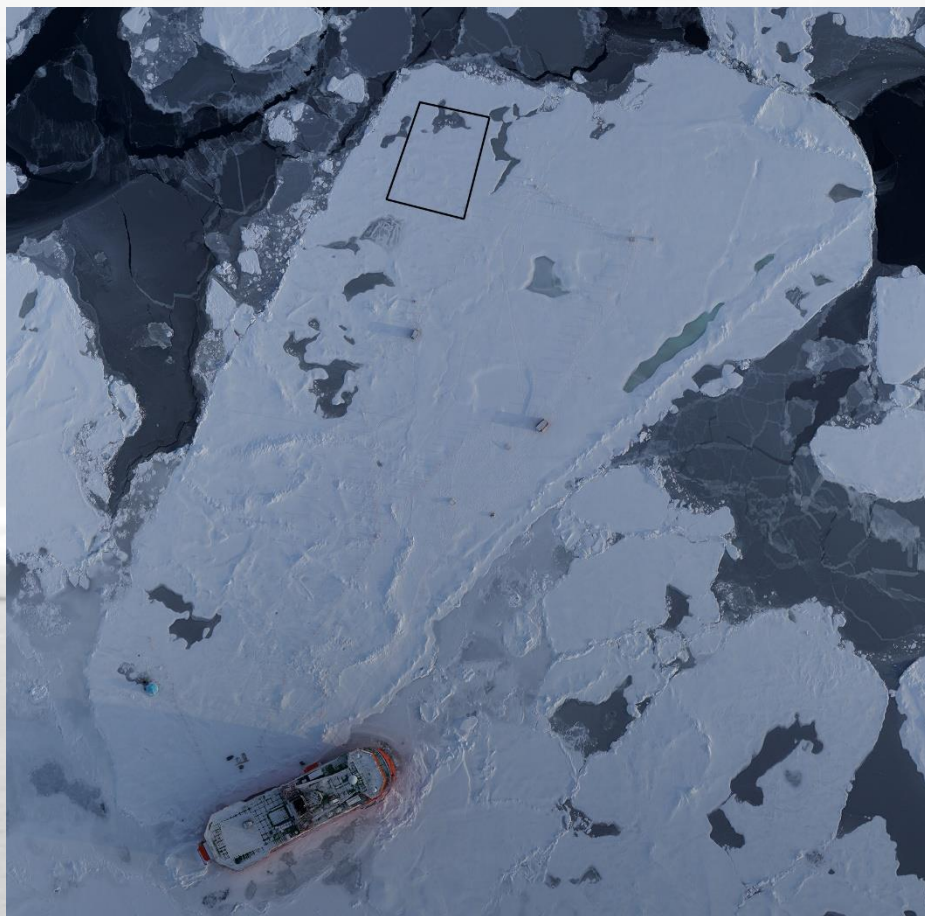
Согласно теоретической оценке [Rudels et al., 1999], при нахождении воды с температурой выше точки замерзания под льдом, менее одной четверти (0.23) потока тепла из воды тратится на таяние, тогда как большая часть уходит через лед в атмосферу. Однако, наличие снега на льду способно значительно изменить это соотношение в сторону возрастания доли поступающего из океана тепла, расходуемого на таяние льда, из-за низкой теплопроводности снега [Доронин и Хейсин, 1975]. С учетом этой неопределенности уменьшение толщины льда (δh) за время δt рассчитывается по формуле (2):

$$\delta h = \frac{\varepsilon F_W}{L \rho_i} \delta t \quad (2)$$

ε – часть потока тепла из океана, расходуемого на таяние льда; $L = 2.5 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$ – удельная теплота плавления морского льда, $\rho_i = 920 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность морского льда.

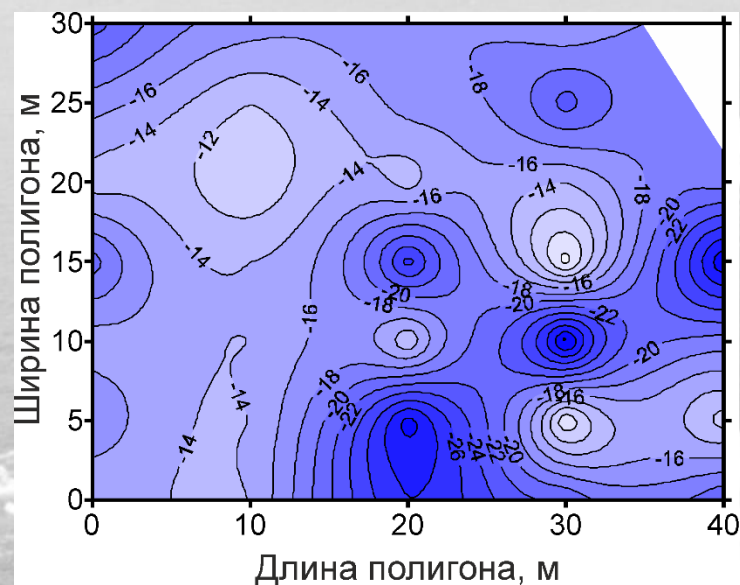
При указанных выше значениях, входящих в формулу (1) переменных получаем поток тепла из океана в атмосферу, равный **$310 \pm 37 \text{ Вт/м}^2$** . Это – очень большая величина, почти на 2 порядка превышающая среднее значение потока тепла из океана в СЛО (2 Вт/м^2) [Untersteiner, 1960]. При задании ε в диапазоне $0.23 - 1$, получаем суточное таяние льда в границах **$2.6 - 11.5 \pm 1.5 \text{ см}$** .

Контактные измерения толщины льда и снега на полигоне СП-41



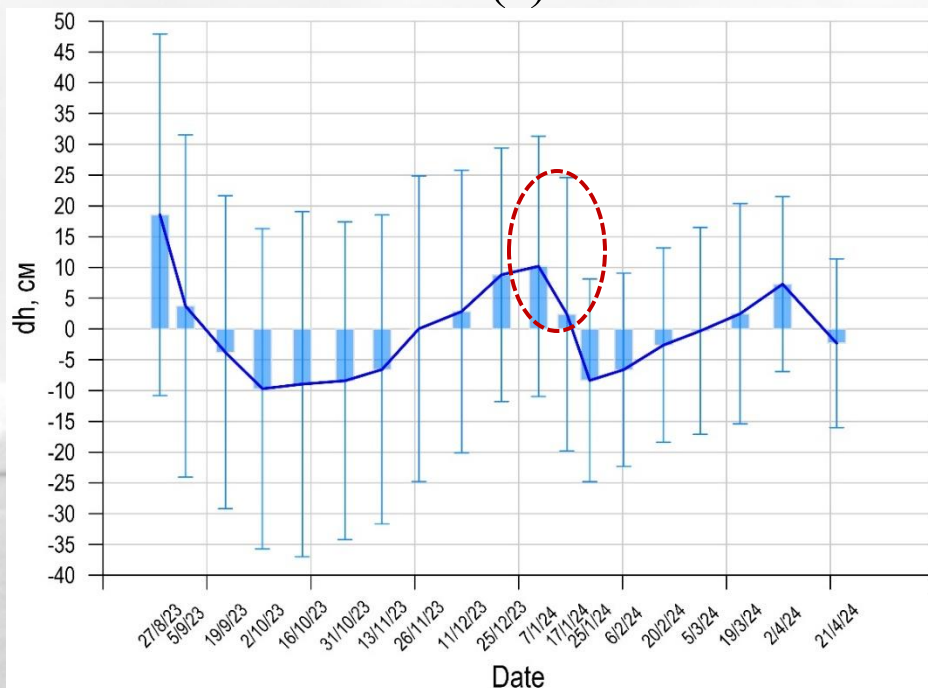
Контактные измерения толщины ровного двухлетнего льда выполнялись на полигоне, расположенном на удалении около 230 м от судна. Из-за небольшого размера льдины размер полигона составлял 30 × 40 м (5 профилей через 10 м, по 7 точек через 5 м на каждом профиле). Точность измерений ± 1 см. Общее количество точек 35, но две ближайшие к судну точки располагались на деформированном льду.

С 7 января несмотря на низкие температуры воздуха началось таяние льда. За период с 7 по 25 января средняя толщина льда на полигоне уменьшилась до 88 см. Средняя скорость таяния с 7 до 25 января изменялась от 0,9 до 1,1 см/сут.

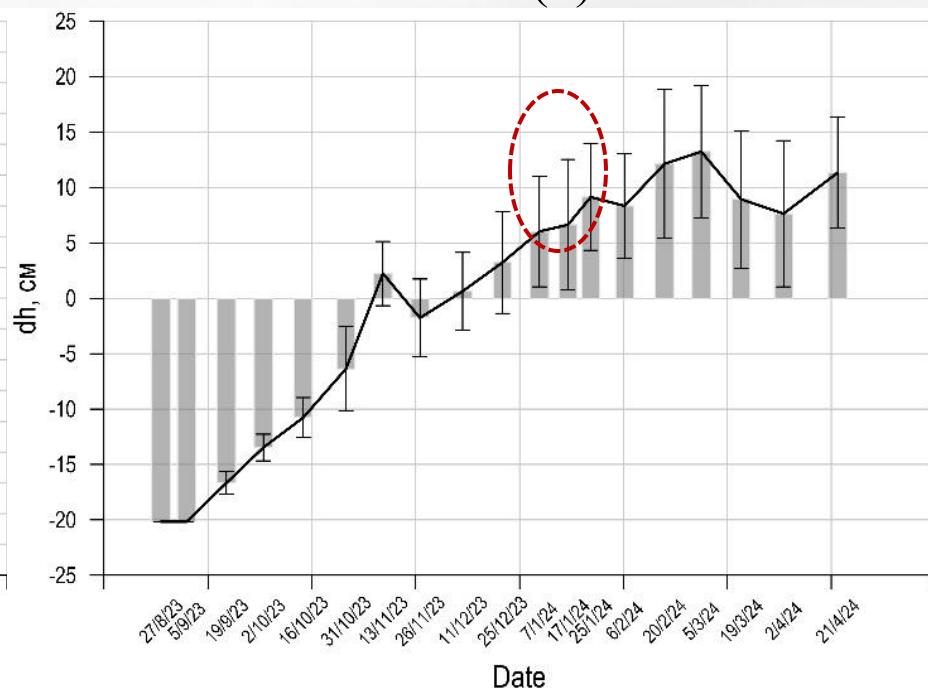


Временные изменения отклонения от средней за весь период наблюдений толщины льда (а) и снега (б) на полигоне СП-41. Среднеквадратическое отклонение по пространству показано «усами»

(а)



(б)



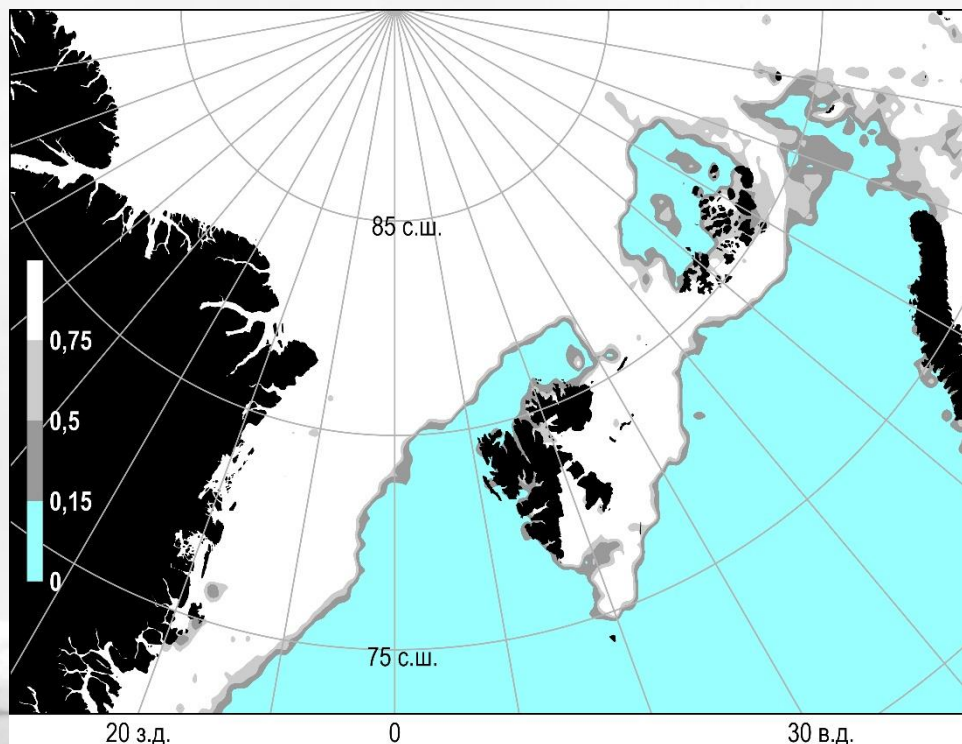
За 17 дней (с 7 до 25 января) средняя толщина льда упала почти до сезонного минимума. Если предположить, что средний поток тепла из океана в течение этого времени ($57 \pm 12 \text{ Вт/м}^2$) полностью расходовался на таяние, то расчет по приведенным выше формулам дает суточное таяние, равное $0.5 - 2.1 \pm 0.4 \text{ см}$, что дает толщину стаявшего за 12 суток льда — $5.5 - 23.5 \pm 4.4 \text{ см}$. Фактическая толщина стаявшего льда с 7 по 25 января 2024 года составила **18 см**. При этом толщина снежного покрова в течение этого временного интервала постоянно возрастала. Это означает, что снежный покров эффективно экранировал поток тепла из океана, который практически полностью расходовался на таяние льда.

Спутниковые данные

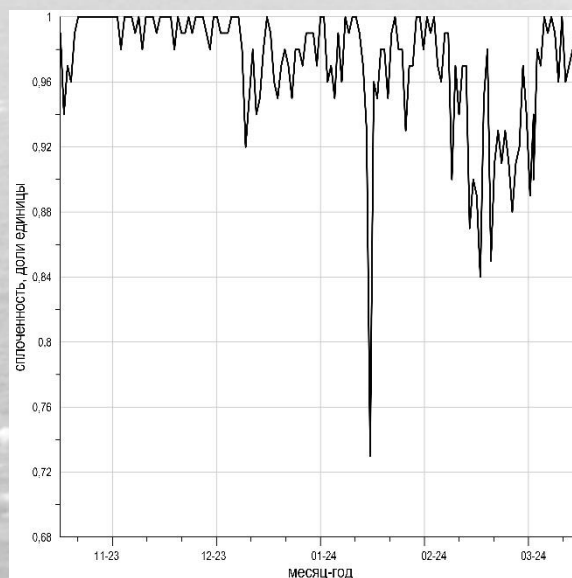
Пространственное распределение сплоченности льда в начале февраля 2024 г. подтверждает развитие к северу от ЗФИ обширной полыньи внутри ледяного массива

Распределение концентрации льда 05.02.2024 по данным <https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>

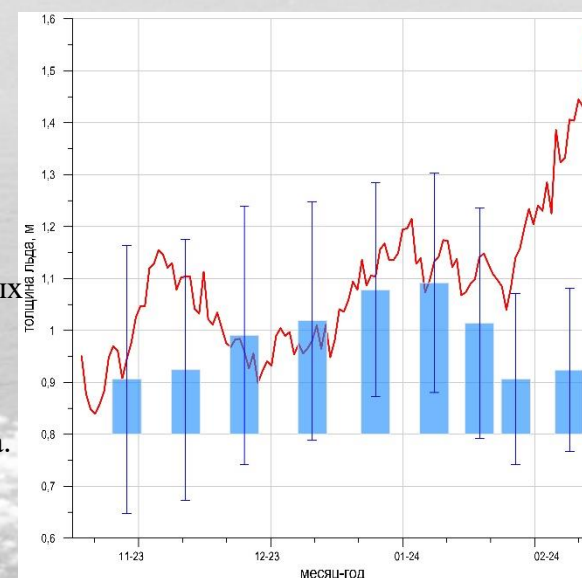
Толщины льда по данным микроволнового диапазона (радиометр MIRAS спутника SMOS, радиоальтиметр SIRAL спутника Cryosat-2) (<https://data.seaiceportal.de/relaunch/>)



Временная изменчивость сплоченности ледяного покрова в районе СП-41 по данным микроволнового диапазона (радиометр AMSR-2 спутника GCOM-W1, алгоритм ASI) (<https://data.seaice.uni-bremen.de/>)



Вертикальными столбиками и «усами» показаны толщина льда, по данным контактных измерений на ледовом полигоне [СП-41](#) и СКО по площади полигона.



Выводы к разделу 5

- ❑ Одновременные измерения толщины льда и температуры воды в экспедиции *СП-41* обеспечили уникальную возможность количественно оценить вклад потока тепла из океана в таяние льда.
- ❑ Подтверждено, что при расположении верхней границы АВ (нулевой изотермы) вблизи поверхности океана (что характерно для ранних зимних месяцев в районе к северу от Земли Франца Иосифа) создаются необходимые предпосылки для реализации эффективного подвода тепла к нижней поверхности ледяного покрова - **атлантификации**.
- ❑ Толщина стаявшего льда, рассчитанная по средней величине потока тепла из водной толщи в середине января 2024 г. соответствует среднему уменьшению толщины льда по данным контактных измерений за этот же временной интервал.
- ❑ Сезонный максимум температуры АВ и расположение ее верхней границы близко к нижней поверхности льда, что наблюдается в районе между Шпицбергенем и ЗФИ примерно в период с декабря по февраль обеспечивает таяние льда снизу, что благоприятствует развитию в этом районе полыней и уменьшению сплоченности ледяного покрова в 2010-2020-е гг. (зафиксированного по спутниковым наблюдениям)

СОДЕРЖАНИЕ

- Введение (краткий обзор исследований)
- Ледостойкая Саломея (ЛСП): наука и жизнь
- Океанологические исследования на ЛСП: задачи и их реализация
- Некоторые предварительные результаты
- Атлантическая бассейна Хансена по ледовым условиям
- Заключение (перспективы дальнейшего использования ЛСП)

Для чего в настоящее время нужны экспедиции в СЛО в формате обитаемой дрейфующей платформы?

1. Для получения новых данных об окружающей среде Арктики
2. Для постоянного присутствия в Северном Ледовитом океане и демонстрации возможностей РФ для изучения/освоения северных территорий
3. Для подтверждения статуса ААНИИ, как ведущего научно-производственного центра РФ, в задачи которого входит изучение природной среды Арктики и информационного обеспечения государственных и коммерческих структур, осуществляющих свою деятельность в арктическом регионе
4. Для реализации личных мотивов участников экспедиции (научный интерес, финансовая поддержка, романтика, уход от обыденности...)

ПЕРСПЕКТИВА....?

В 21-м веке гидрометеорологические исследования в Арктике активизировались благодаря массовому внедрению в практику дистанционных методов зондирования и автономных измерительных приборов. Этому также способствовало, повышение мощности вычислительных комплексов, позволяющих на качественно новом уровне осуществлять обработку и усвоение данных наблюдений.

Означает ли это, что эпоха целенаправленных морских экспедиций в Северный Ледовитый океан на научно-исследовательских судах и дрейфующих обитаемых платформах уходит в прошлое?



**СПАСИБО всем коллегам,
собравшим уникальные данные
на «СП-41» и «СП-42» и экипажу
ЛСП «Северный Полюс»!**

*Доклад подготовлен при поддержке
проекта РНФ 24-17-00041*