

*Иванов В.В.*<sup>1,2</sup>

*Фильчук К.В.*<sup>2</sup>, *Карпов М.В.*<sup>2</sup>, *Ковалев С.М.*<sup>2</sup>, *Ризе Д.Д.*<sup>2</sup>,  
*Павский С.В.*<sup>2</sup>, *Афанасьева Е.В.*<sup>2</sup>, *Соколов А.А.*<sup>2</sup>

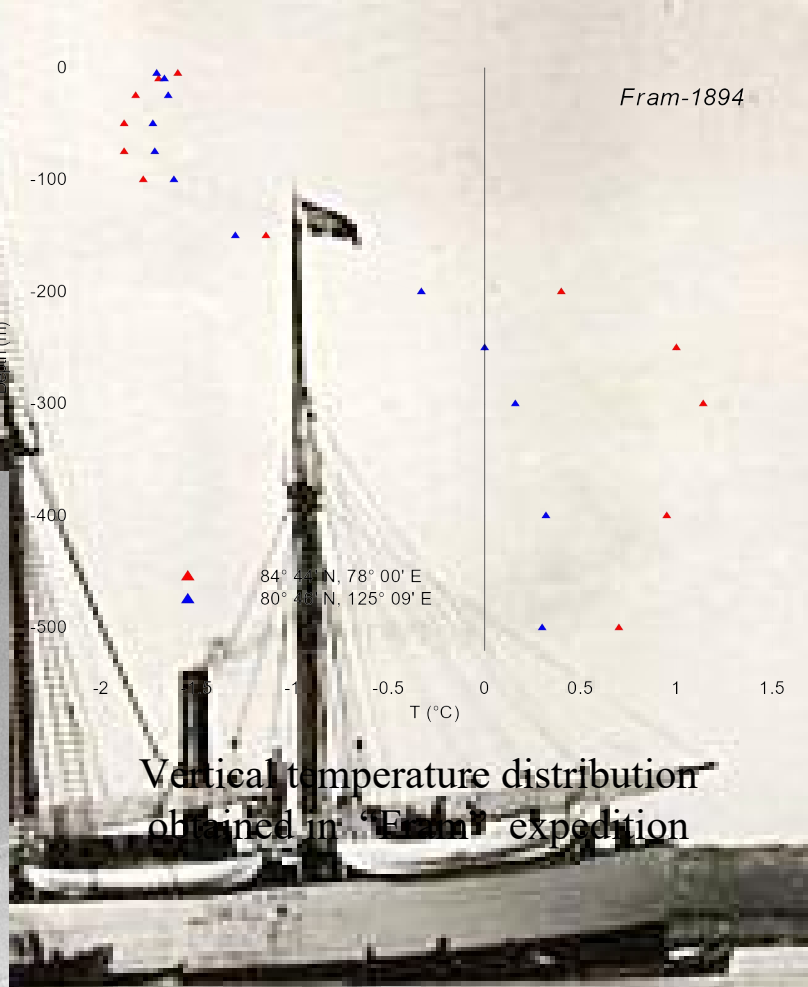
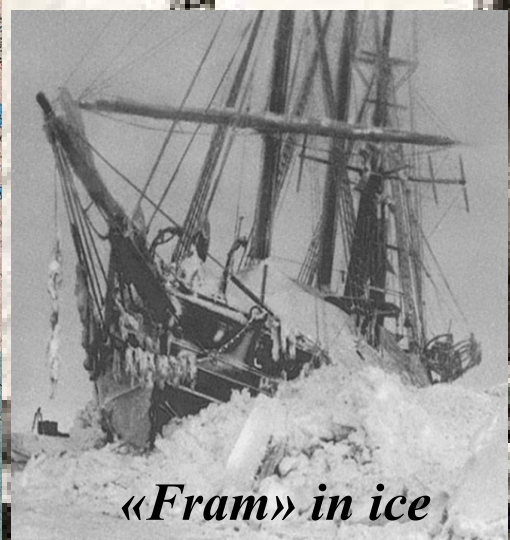
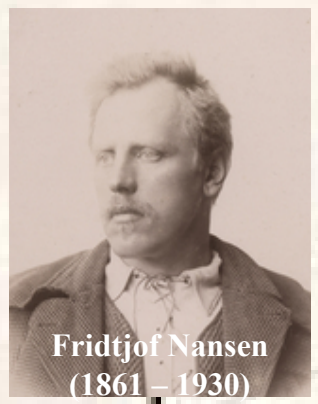
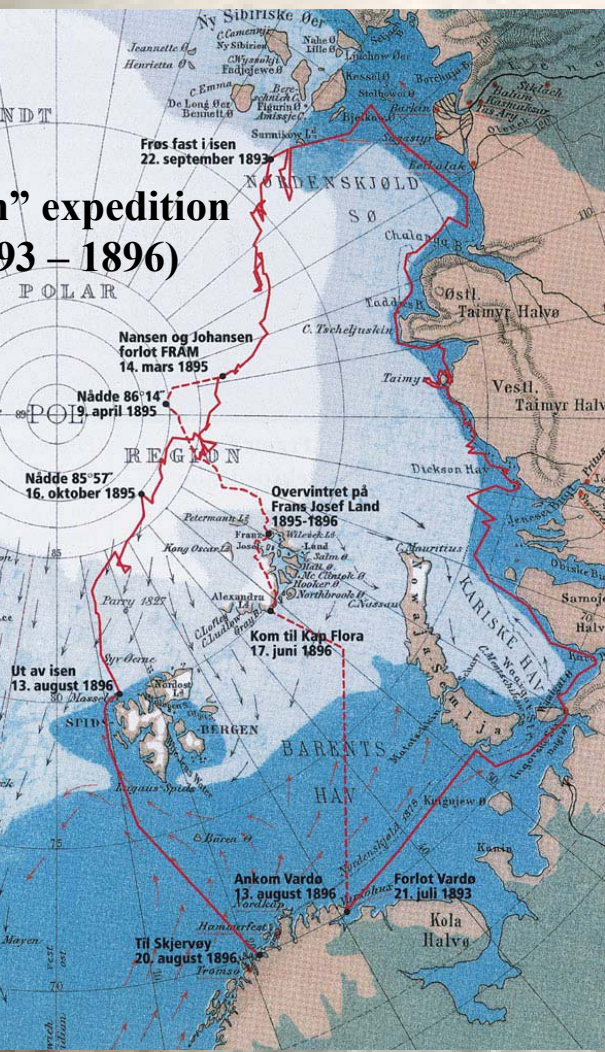
**Особенности пространственно-временной изменчивости  
температуры атлантических вод в западной части  
бассейна Нансена и их проявление в состоянии ледяного  
покрова**

<sup>1</sup> *Московский государственный университет, г. Москва*

<sup>2</sup> *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург*



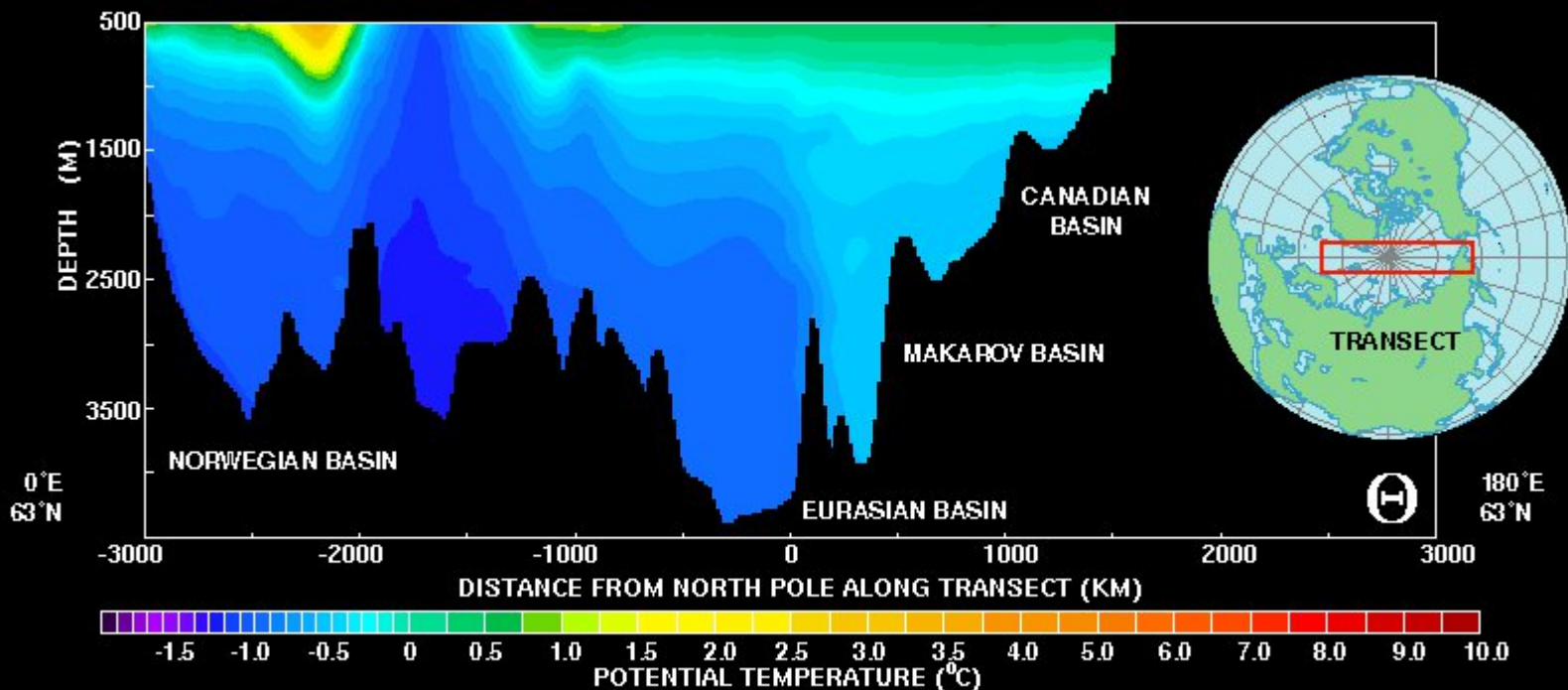
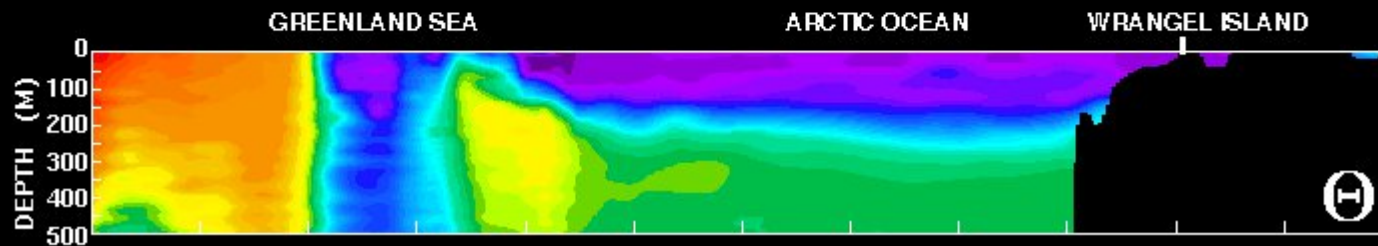
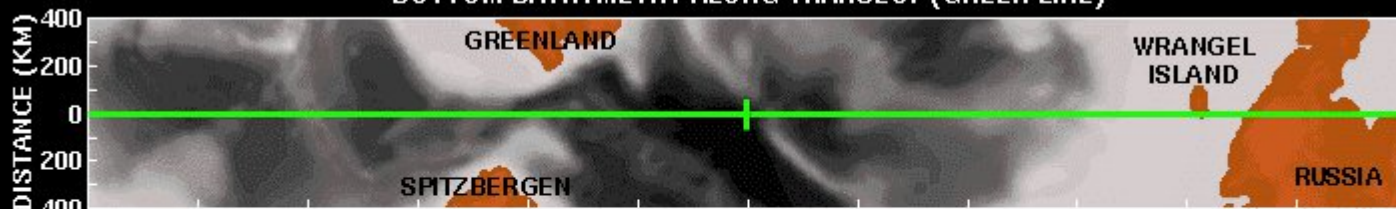
Atlantic origin water in the Arctic Ocean is a relatively thin (600-800 m) warm intermediate layer embedded between the cold, fresher upper water and cold saltier deep water



first report about the warm water below the pack ice in the Arctic Ocean was published by **F. Nansen (1902)** basing on **Fram expedition (1893-1896)**

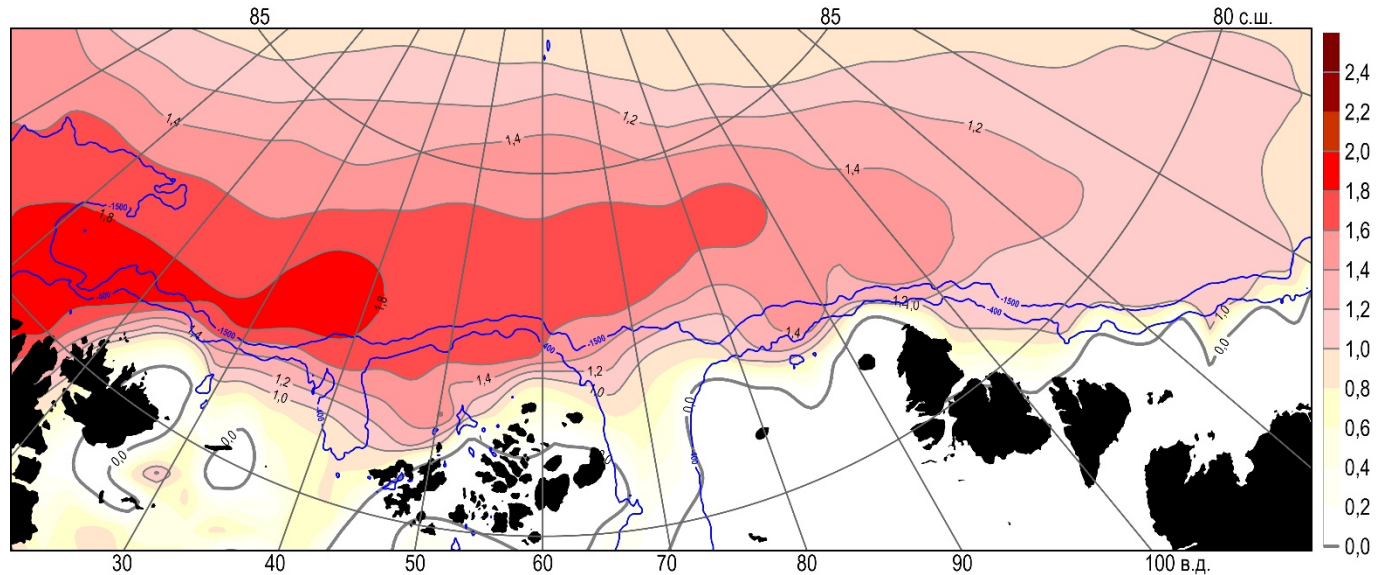
# POTENTIAL TEMPERATURE ALONG MERIDIONAL TRANSECT 000°-180°

BOTTOM BATHYMETRY ALONG TRANSECT (GREEN LINE)

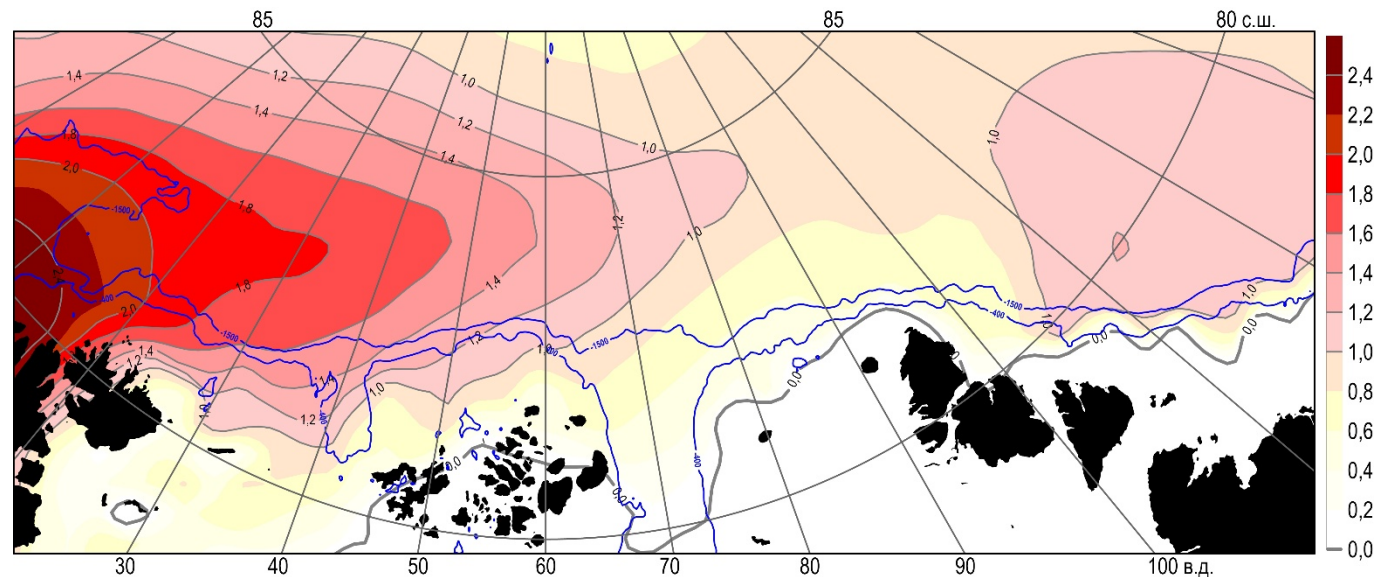


# Сезонные изменения средней за 1950 – 1990 гг. максимальной температуры воды ( $> 0^{\circ}\text{C}$ ) в промежуточном слое (на глубине более 50 м)

*январь - март*



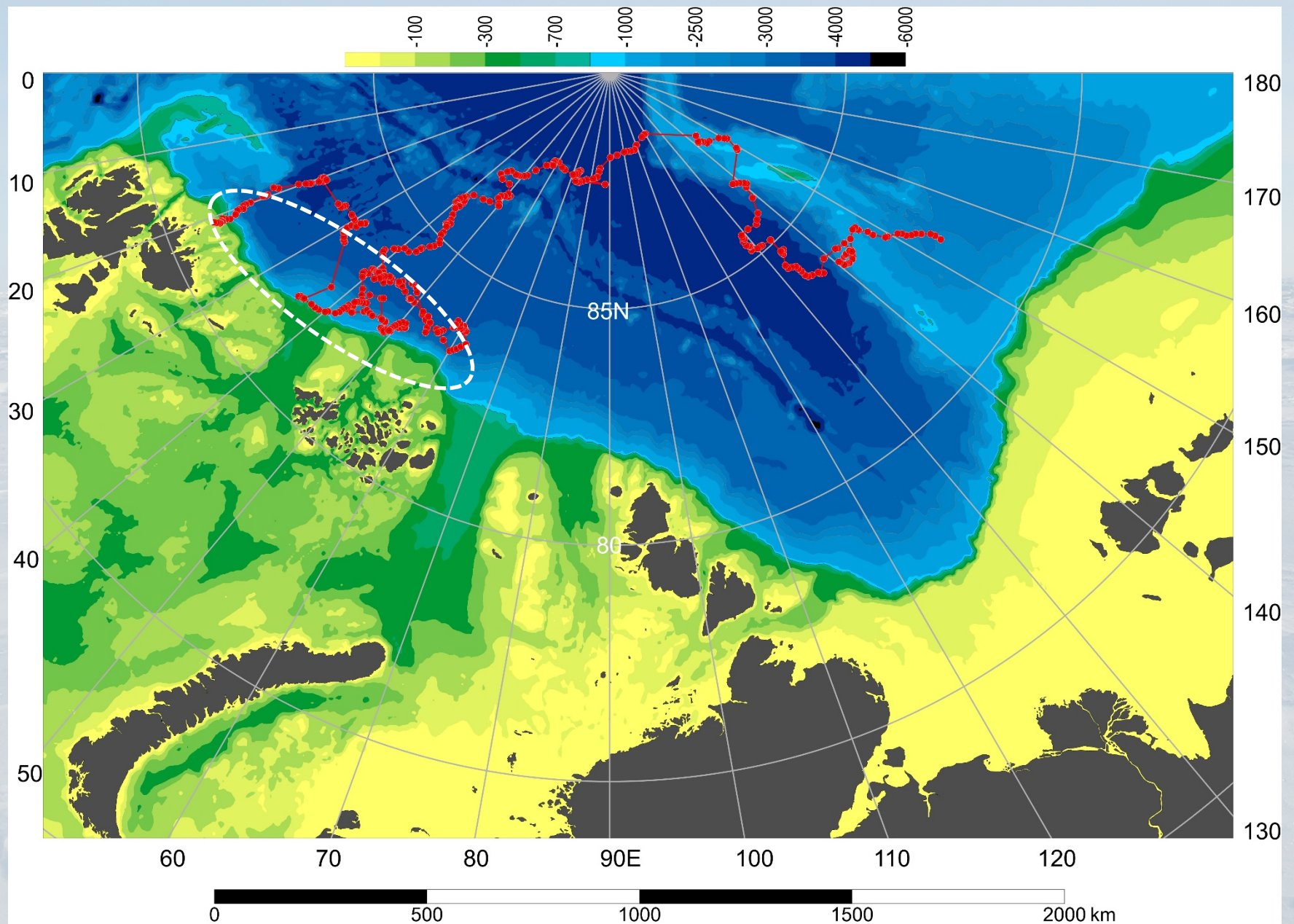
*июль - сентябрь*



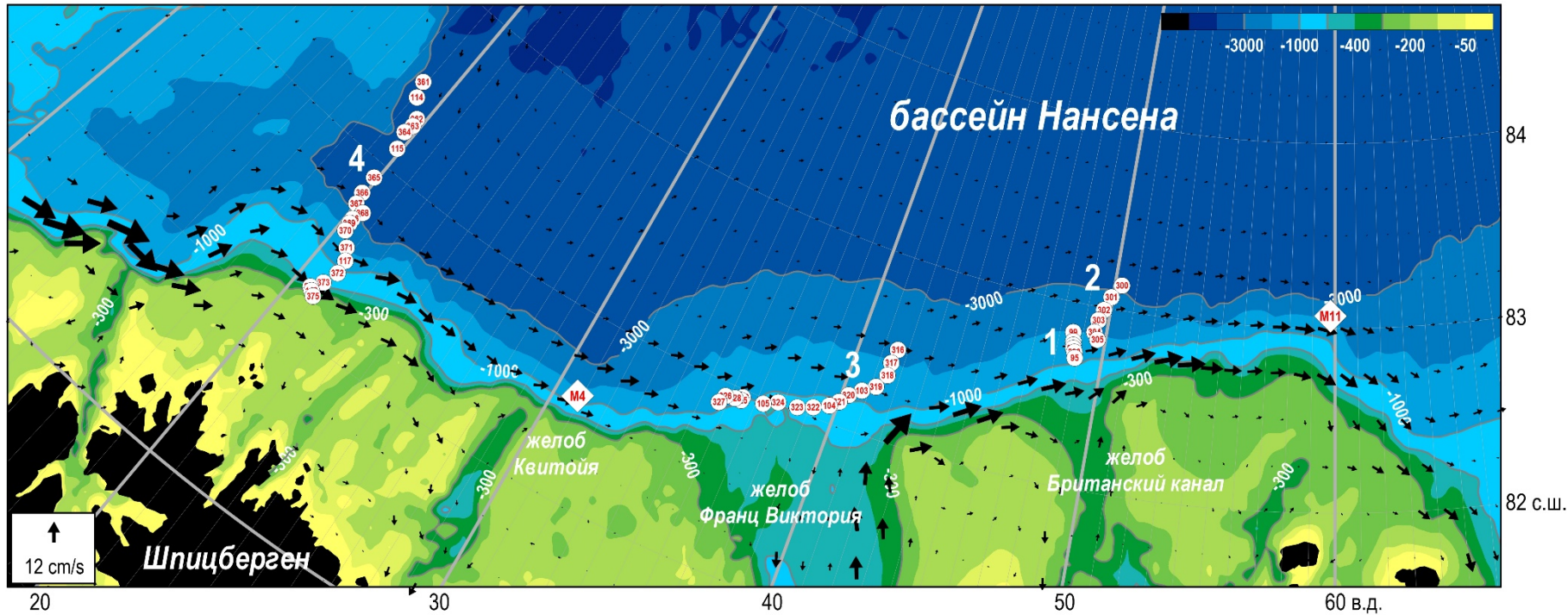
Синим цветом показаны изобаты 400 и 1500 м

[EWG, 1997, 1998]

# Схема дрейфа СП-41



# Расположение СТД-станций на разрезах СП-41 и долговременных автономных буйковых станций (АБС) NABOS (M4 и M11)



**Время выполнения разрезов:**

**Разрез 1: 29.11 – 02.12.23**

**Разрез 2: 20.12 – 25.12.23**

**Разрез 3: 11.01 – 15.01.24**

**Разрез 4: 20.03 – 01.04.24**

**Время постановки АБС:**

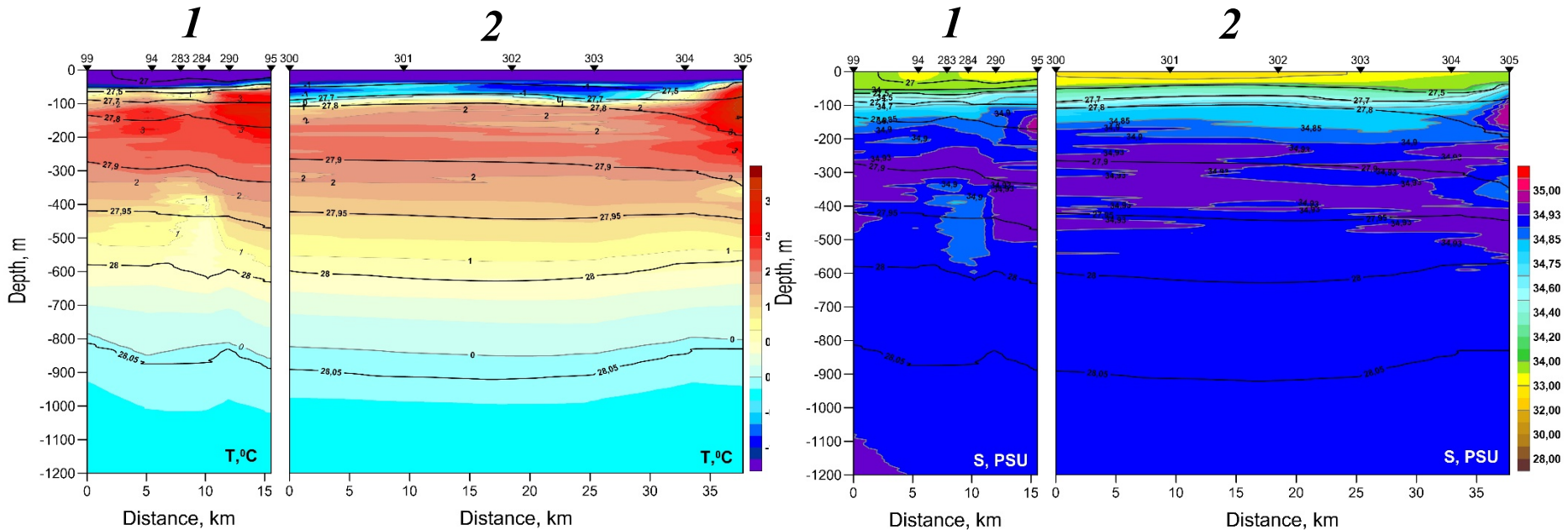
**M4: 09.2004 – 10.2008**

**09.2009 – 09.2010**

**M11: 10.2008 – 09.2011**

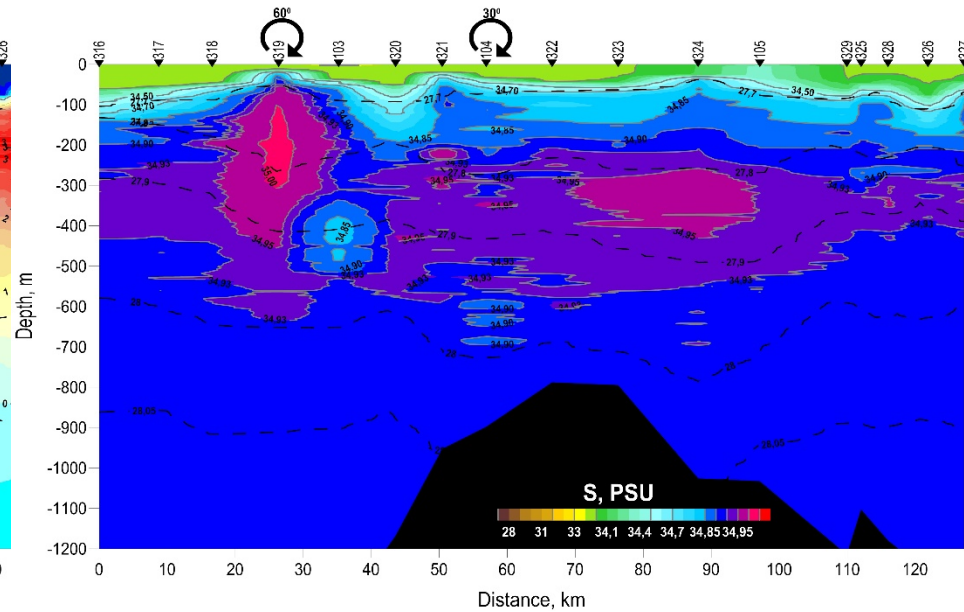
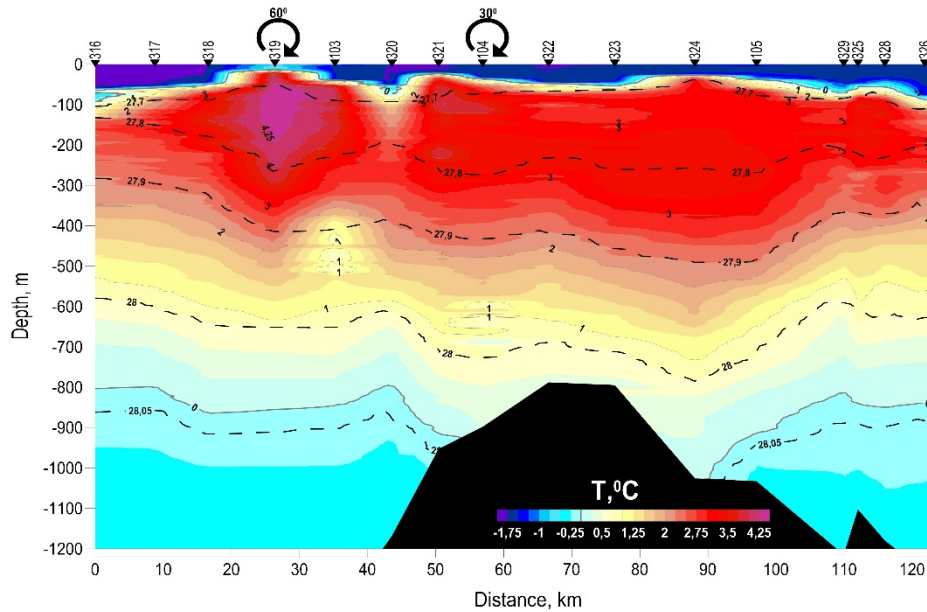
*Векторы средней (1994 – 2023) скорости течения в слое 150 – 500 м по данным реанализа ORAS5 (CMEMS) показаны стрелками*

# Распределение температуры (слева) и солености (справа) на разрезах 1 и 2



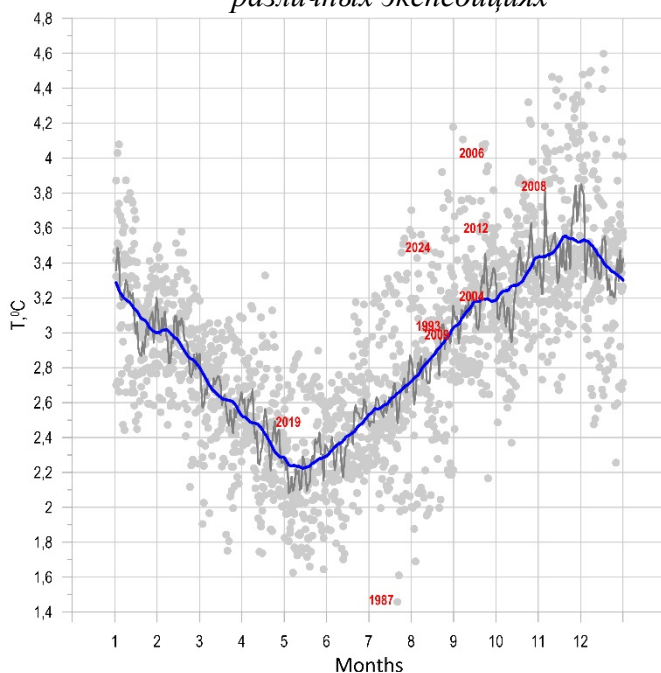
Разница между временем выполнения разрезов 1 и 2 составляет  $21 \pm 3$  сут. При расстоянии между ст. 95 и ст. 305 17 км, для того, чтобы теплое ядро атлантической воды (АВ) сместилось за это время от разреза 1 до разреза 2, его скорость должна быть менее 1 см/с. Средняя скорость течения между разрезами 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*

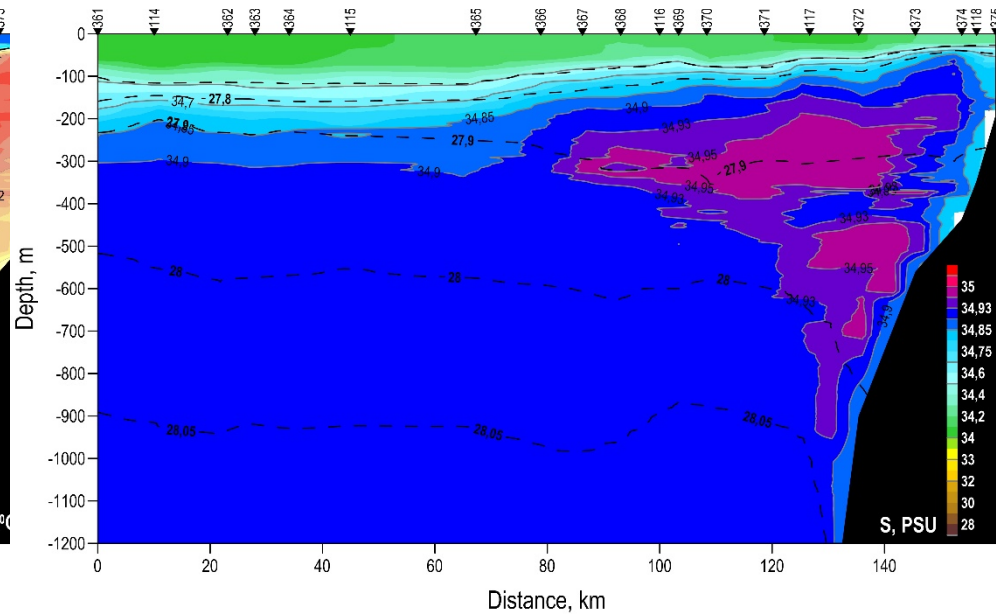
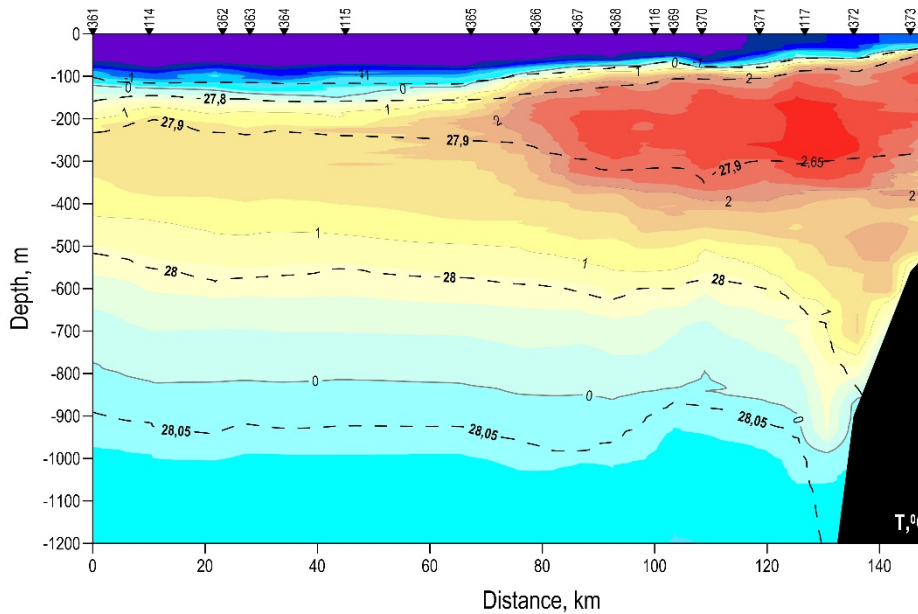


## Сезонные колебания температуры АВ в бассейне Нансена

*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

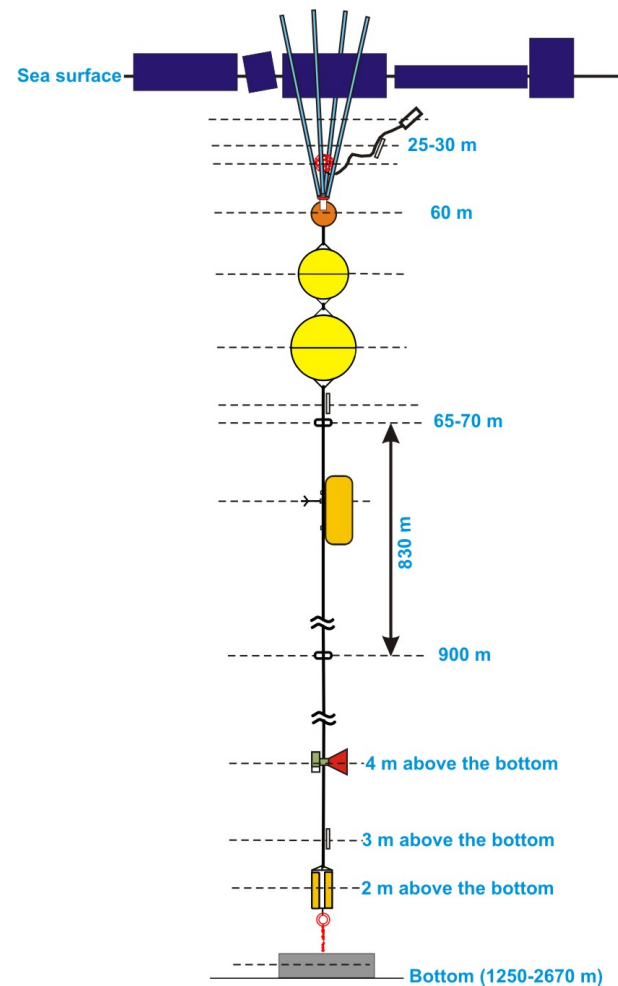
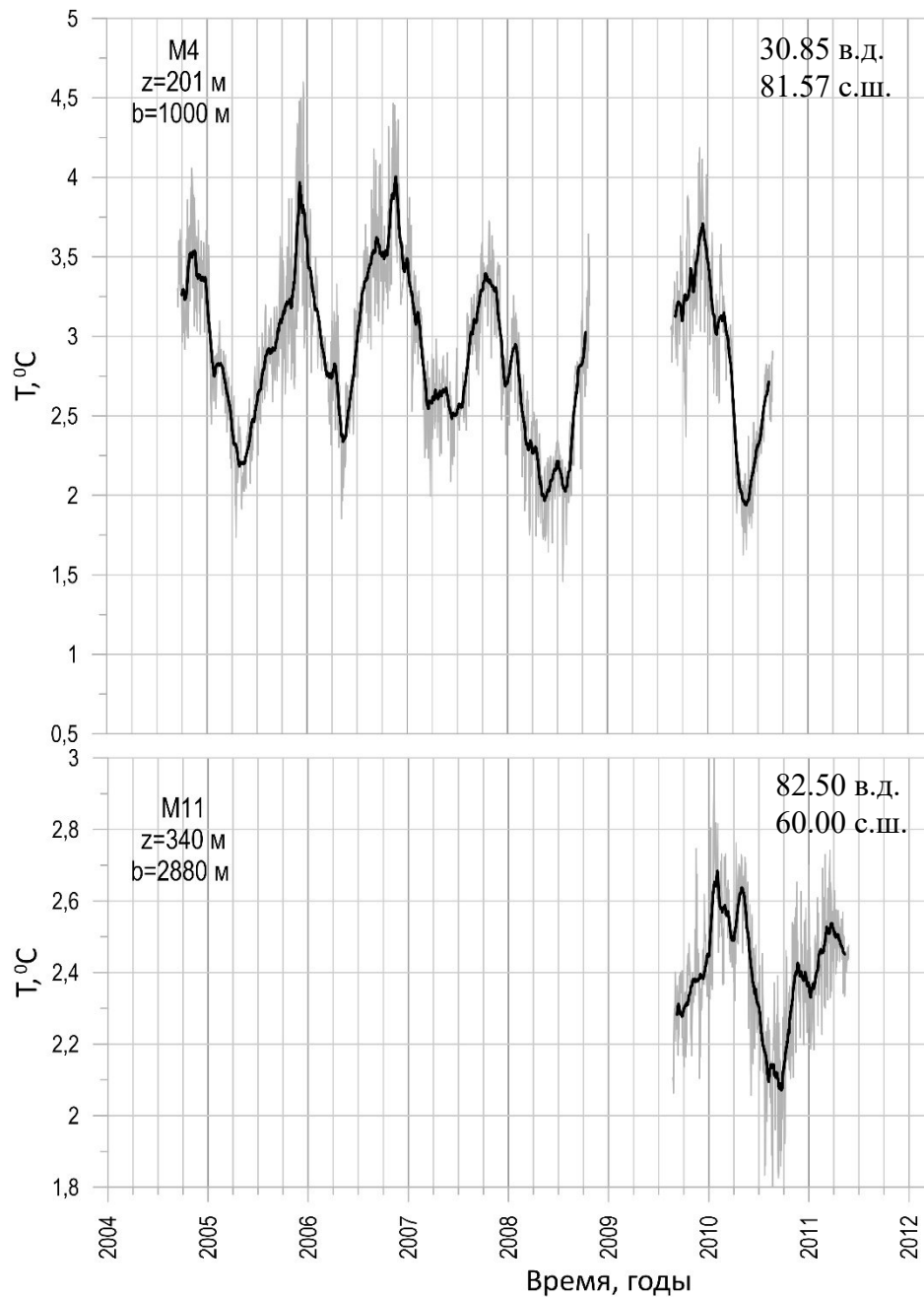


Схема автономной  
буйковой станции  
(АБС) NABOS

# Записи температуры воды на АБС М4 и М11

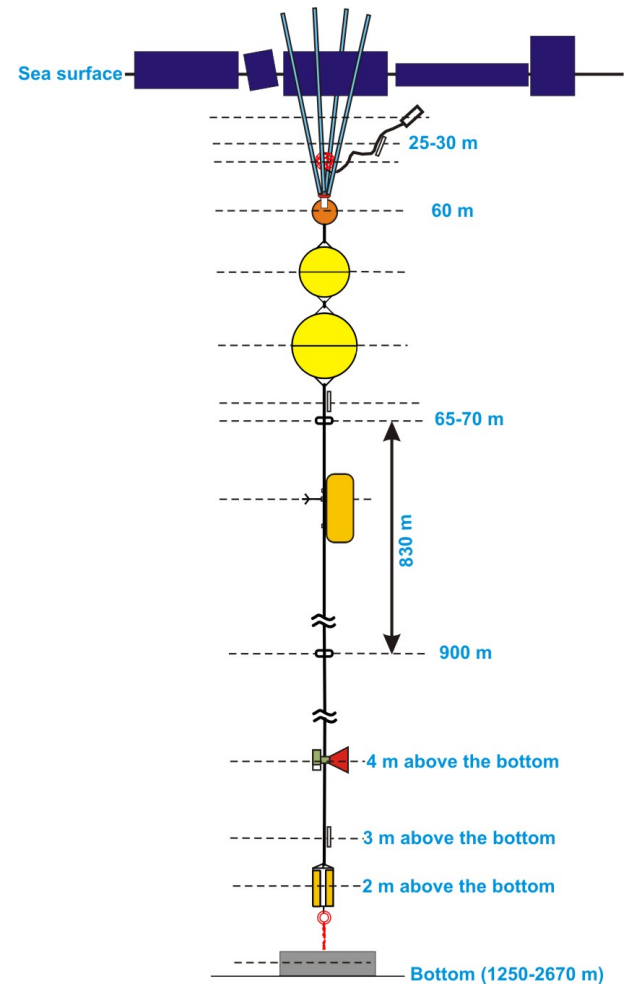
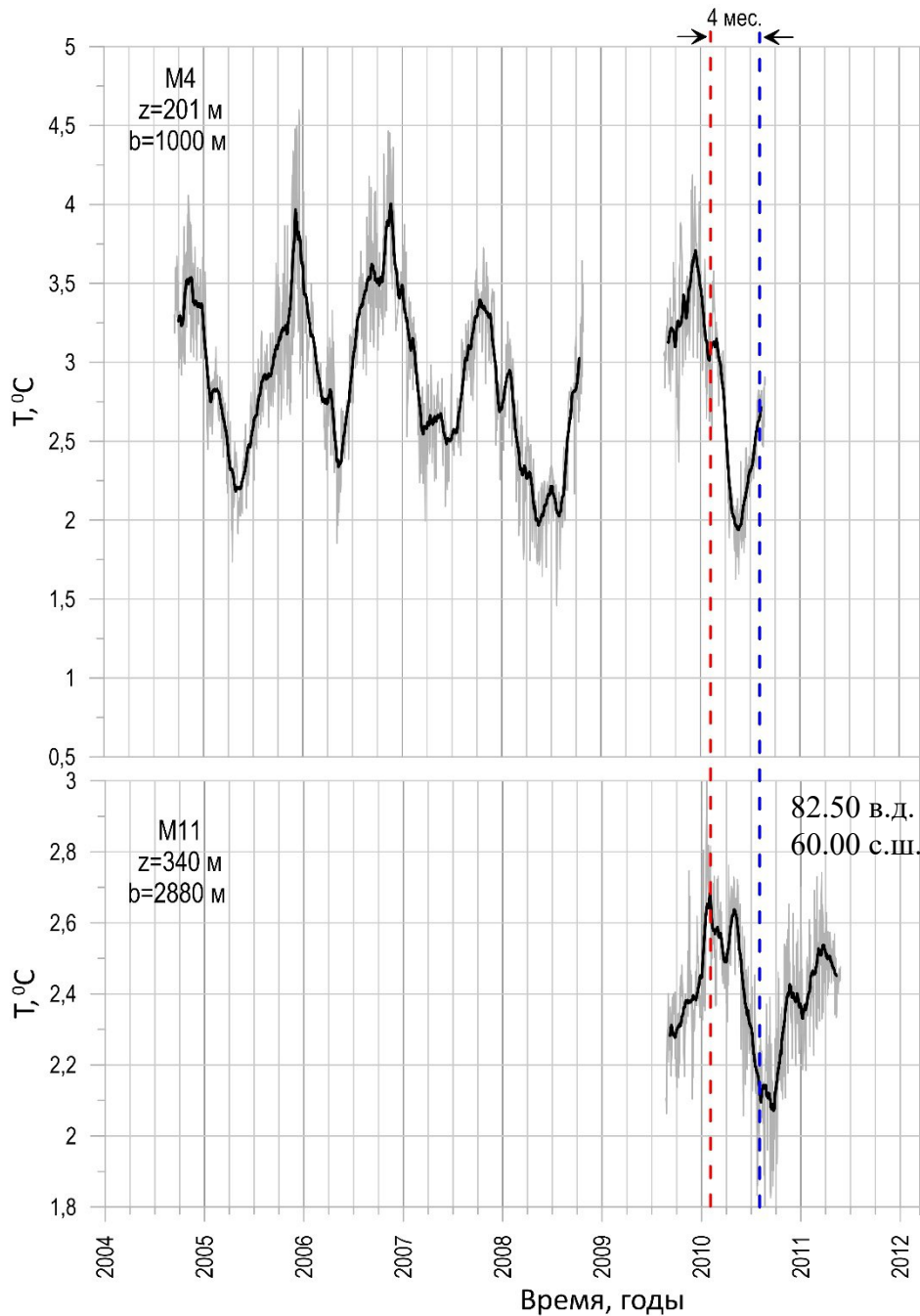
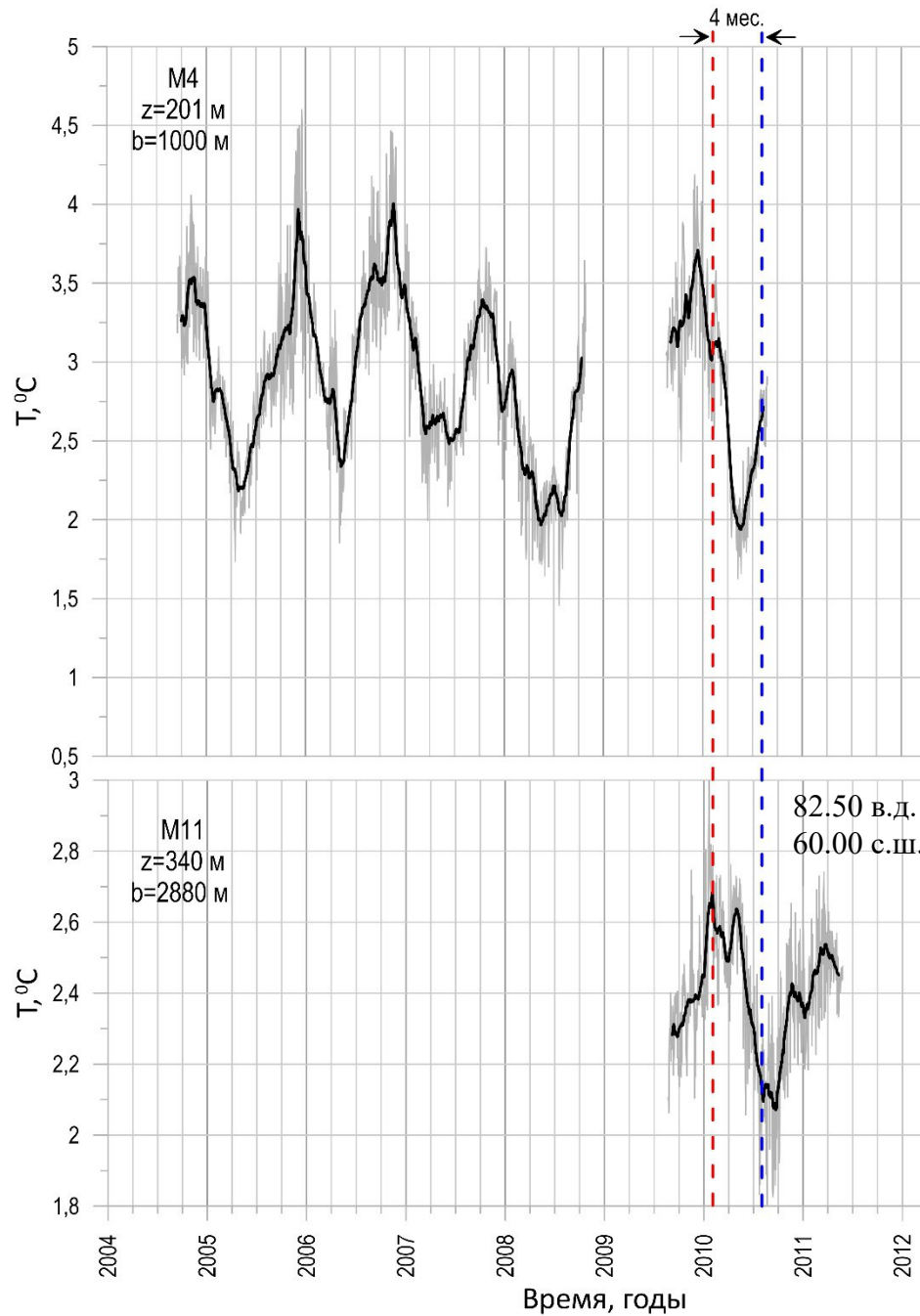
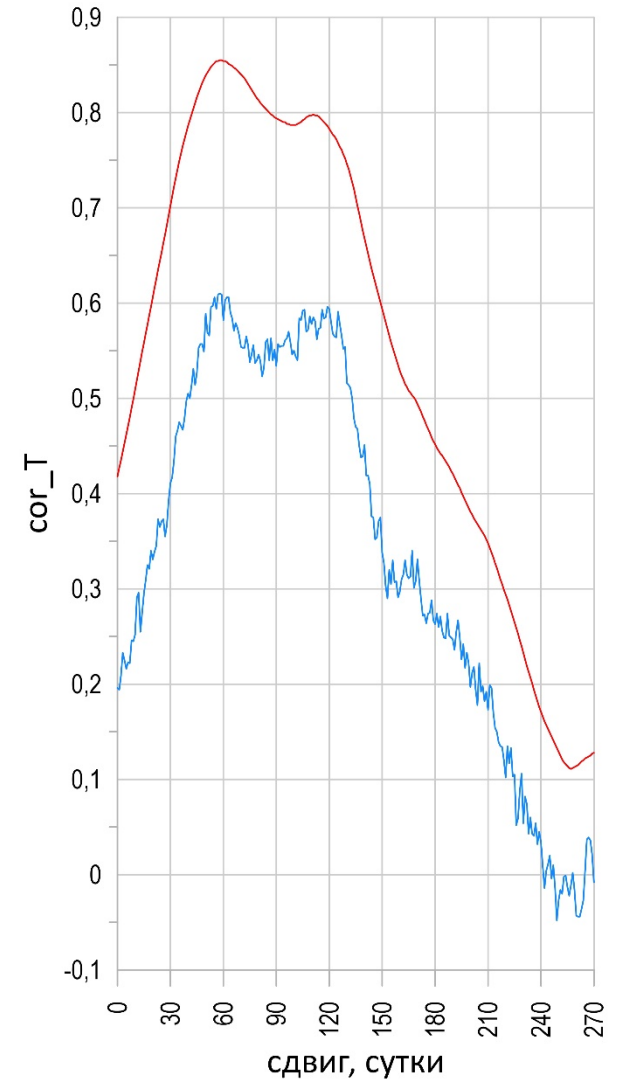


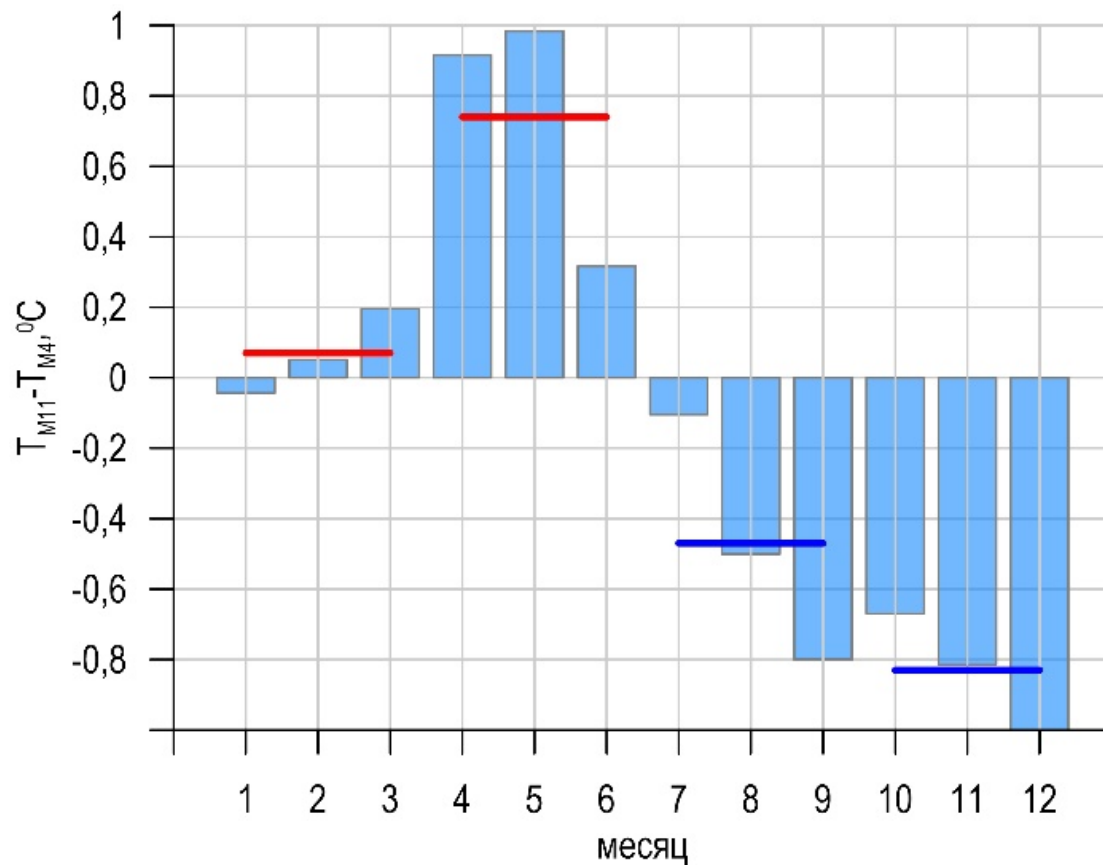
Схема автономной  
 буйковой станции  
 (АБС) NABOS

# Записи температуры воды на АБС М4 и М11



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

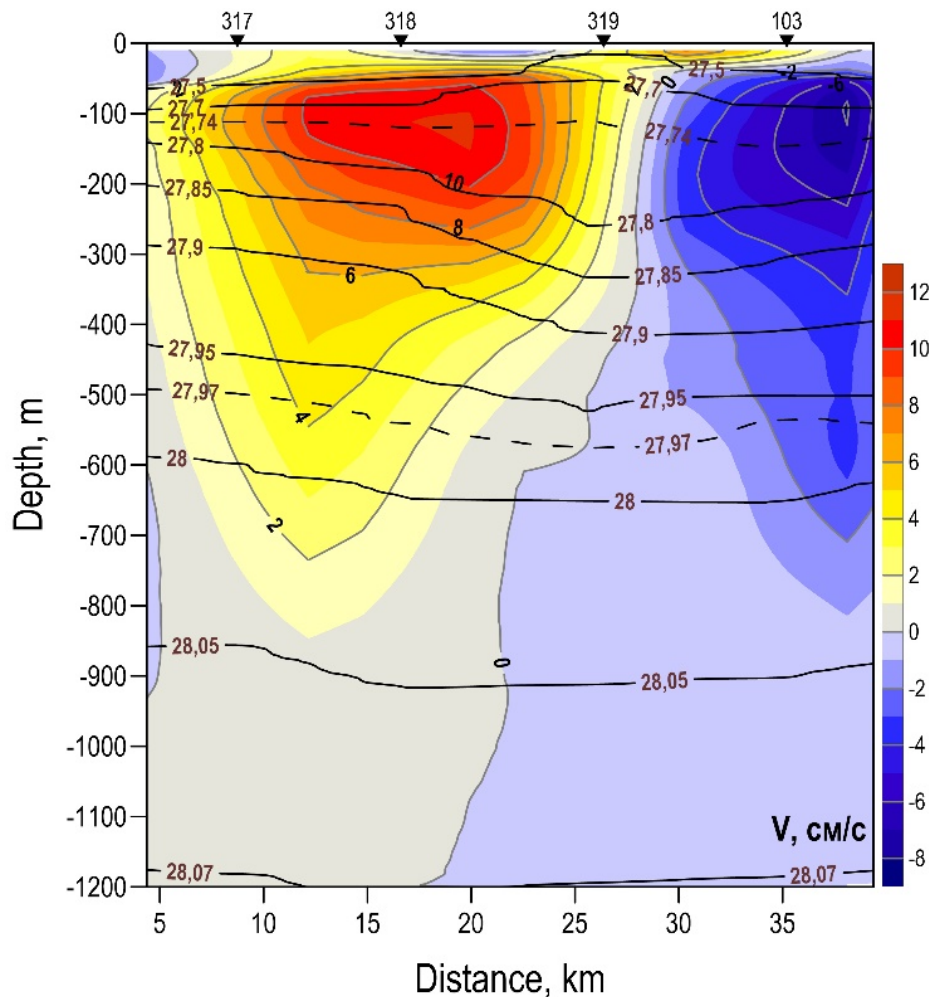




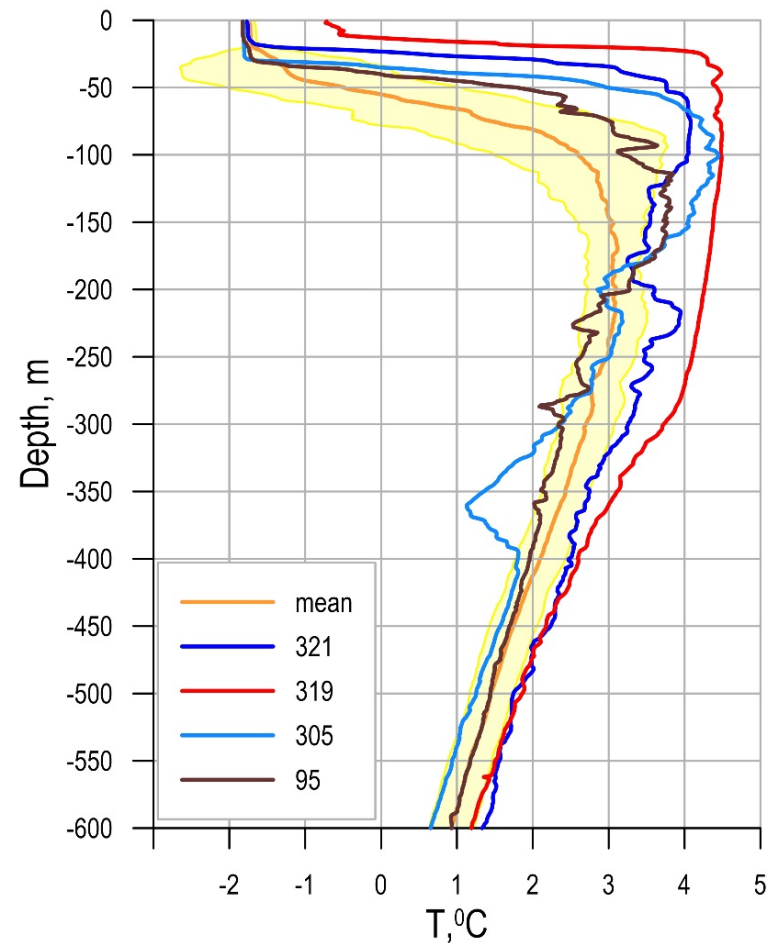
В результате перемещения сезонной «тепловой волны», уменьшение температуры происходит в летний и осенний сезоны, тогда как зимой и весной наблюдается ее рост. Выявленная закономерность вполне объясняет возрастание максимальной температуры в ядре АВ между разрезами 4 и 3, разницей во времени выполнения 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).

# Обоснование гипотезы 1

Вертикальное распределение нормальной к плоскости разреза 3 геострофической скорости течения (см/с) относительно «нулевого» отсчетного уровня 1200 м. Положительные значения соответствуют направлению скорости – «в рисунок». Изолинии аномалий потенциальной плотности от  $1000 \text{ кг/м}^3$  показаны черным цветом.



Вертикальные профили температуры в слое 0 – 600 м на отдельных станциях и средний профили для станций, расположенных к западу от ст. 104 на разрезе 3.



## Оценки потока тепла из океана к нижней поверхности льда

Температура воды на глубине 1 м над вертикальной осью линзы (ст. 319) равна  $-0.71^{\circ}\text{C}$ , что на  $1.15^{\circ}\text{C}$  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,  $C_D = 0.0025 - 0.0035$  – 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,  $\rho = 1028$  кг/м<sup>3</sup> – средняя плотность морской воды,  $c_p = 3970$  Дж/кг/К – удельная теплоемкость морской воды при постоянном давлении.

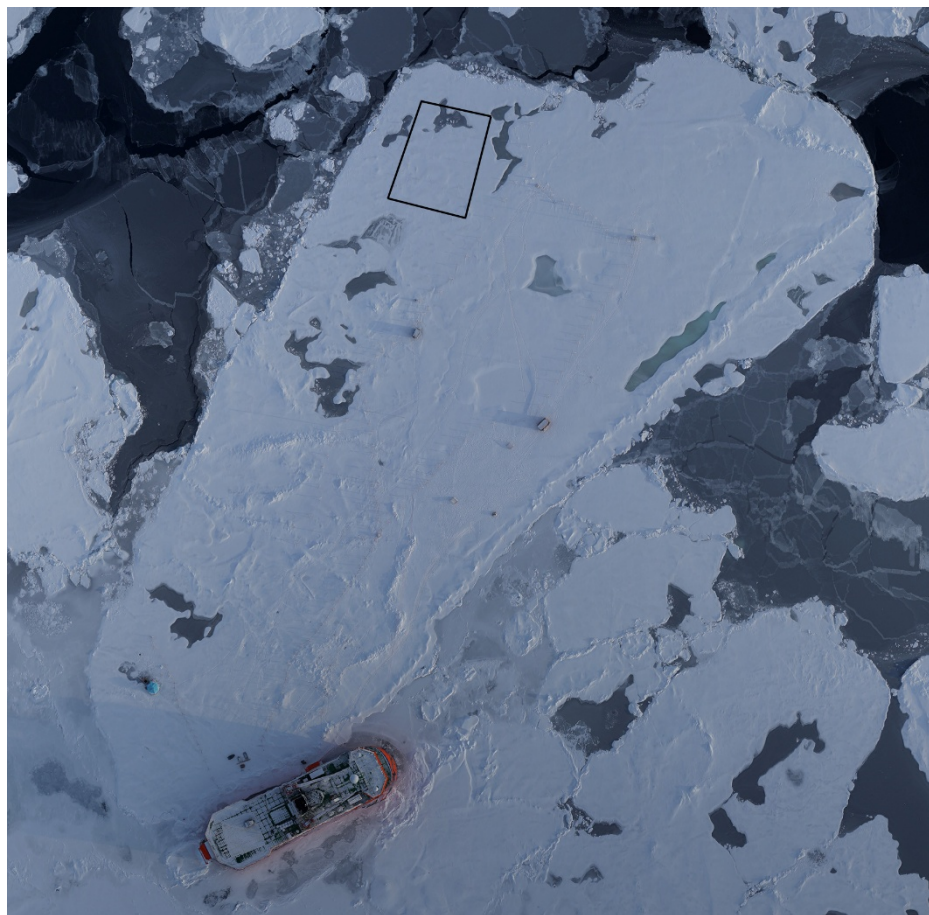
Согласно теоретической оценке [Rudels et al., 1999], при нахождении воды с температурой выше точки замерзания под льдом, менее одной четверти (0.23) потока тепла из воды тратится на таяние, тогда как большая часть уходит через лед в атмосферу. Однако, наличие снега на льду способно значительно изменить 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 ( $\delta h$ ) за время  $\delta t$  рассчитывается по формуле (2):

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

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

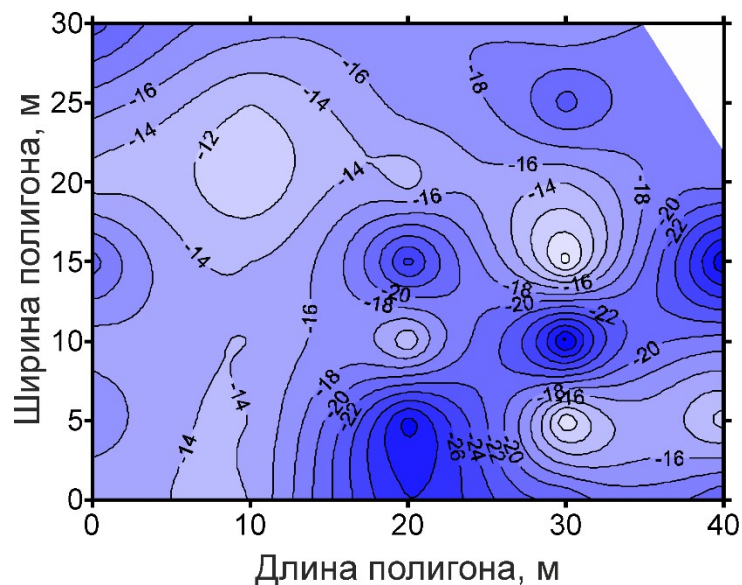
При указанных выше значениях, входящих в формулу (1) переменных получаем поток тепла из океана в атмосферу, равный  $179 \pm 16$  Вт/м<sup>2</sup>. Это – очень большая величина, почти на 2 порядка превышающая среднее значение потока тепла из океана в СЛЮ ( $2$  Вт/м<sup>2</sup>) [Untersteiner, 1960]. При задании  $\varepsilon$  в диапазоне  $0.23 - 1$ , получаем суточное таяние льда в границах  $1.5 - 6.7$  см.

## Контактные измерения толщины льда и снега на полигоне СП-41

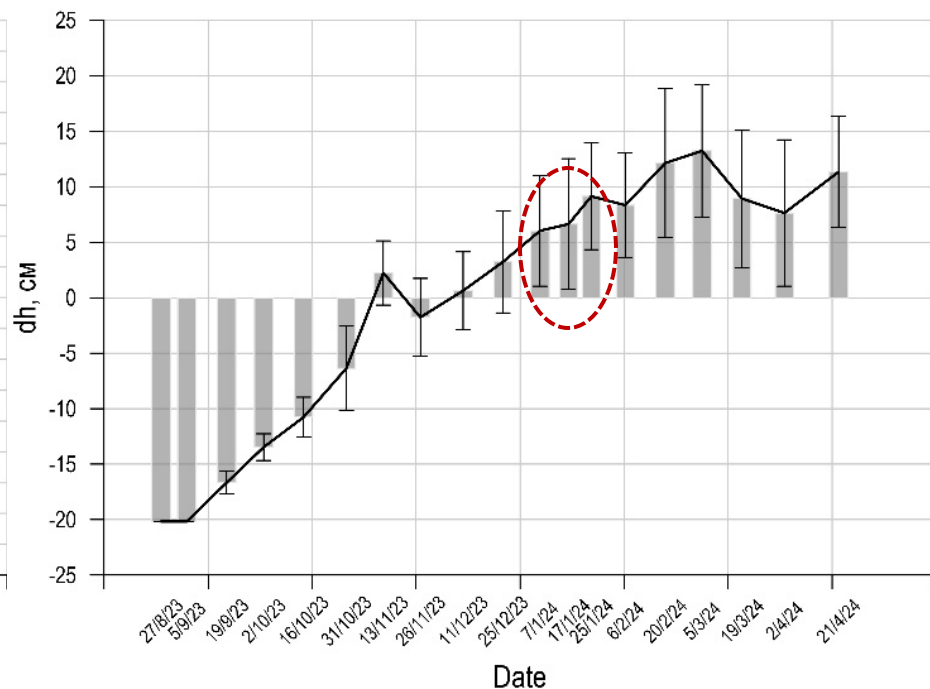
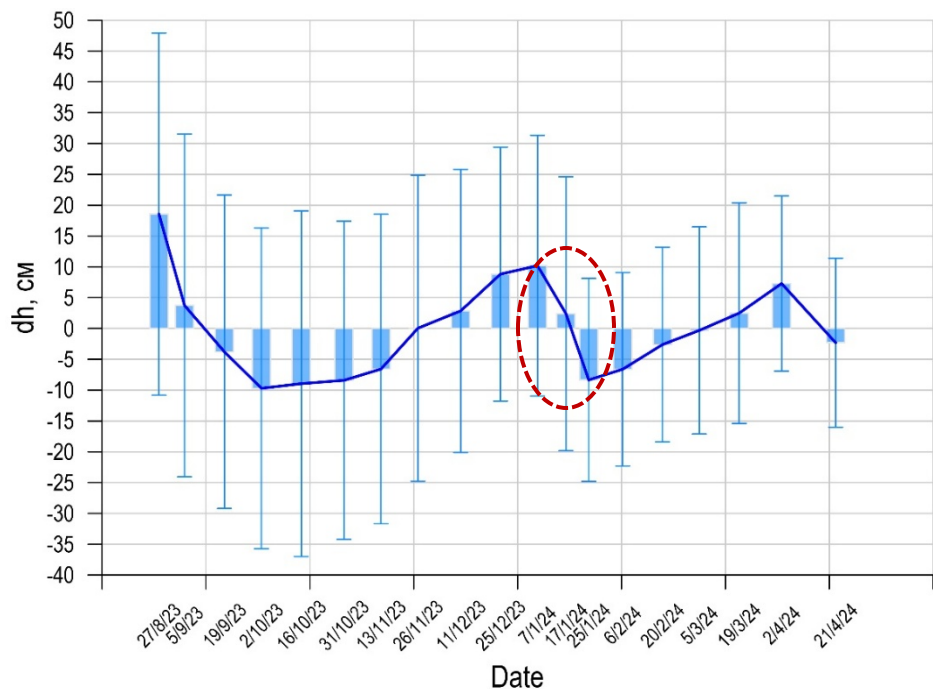


Контактные измерения толщины ровного двухлетнего льда выполнялись на полигоне, расположенном на удалении около 230 м от судна. Из-за небольшого размера льдины размер полигона составлял  $30 \times 40$  м (5 профилей через 10 м, по 7 точек через 5 м на каждом профиле). Точность измерений  $\pm 1$  см. 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»



За 17 дней (с 7 до 25 января) средняя толщина льда упала почти до сезонного минимума. Если предположить, что поток тепла из океана полностью расходовался на таяние, то расчет по приведенным выше формулам дает суточное таяние, равное 1.3 см, что дает толщину стаявшего за 12 суток льда – **16 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:  $\varepsilon = 1$  в формуле (2).

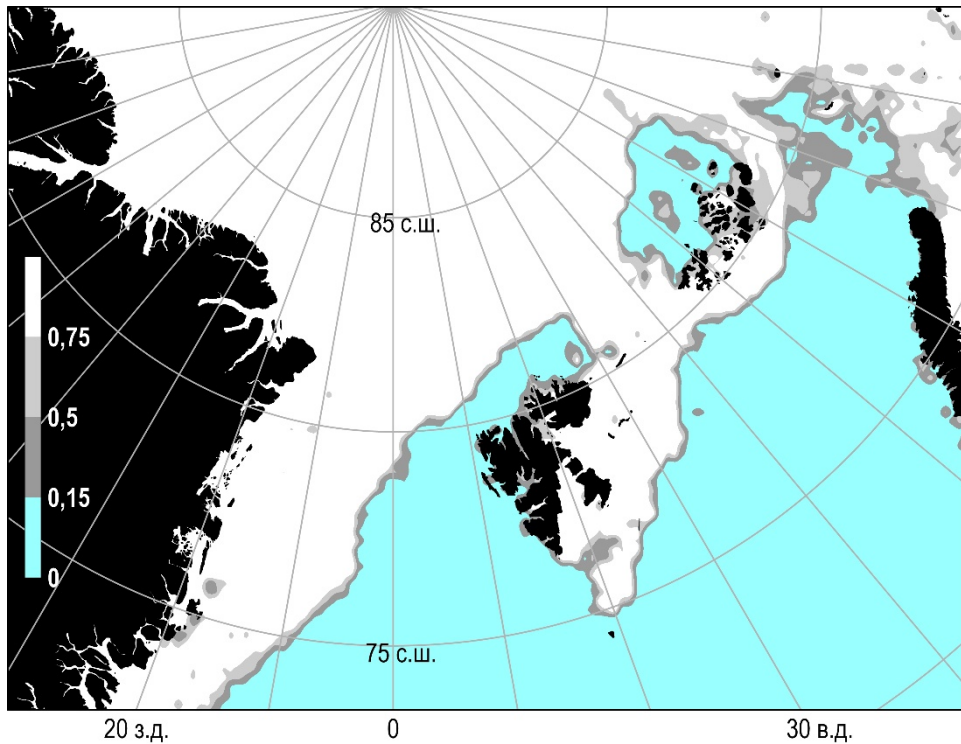
## Спутниковые данные

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

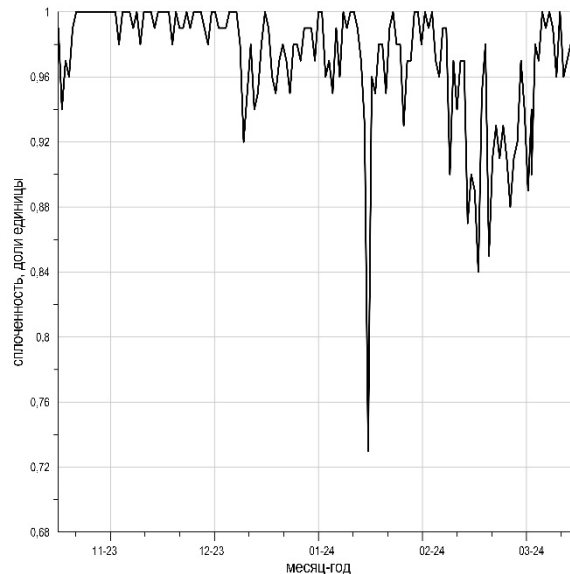
Распределение концентрации льда 05.02.2024 по данным <https://data.seaice.uni-bremen.de/databrowser/>

Толщины льда по данным микроволнового диапазона (радиометр MIRAS спутника SMOS, радиоальтиметр SIRAL спутника Cryosat-2)

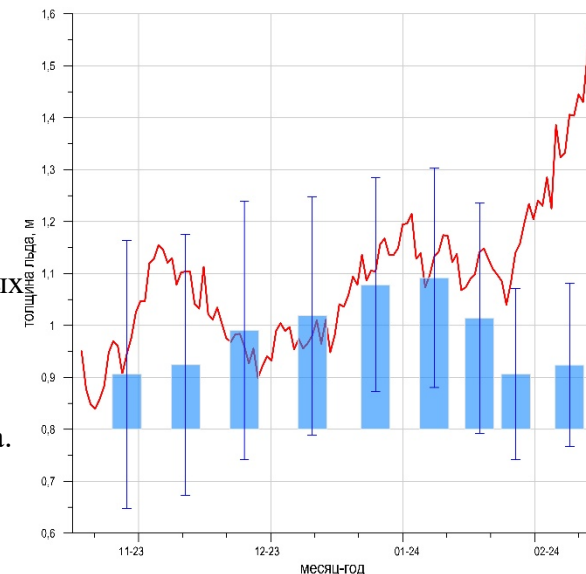
(<https://data.seaiceportal.de/relaunch/>)



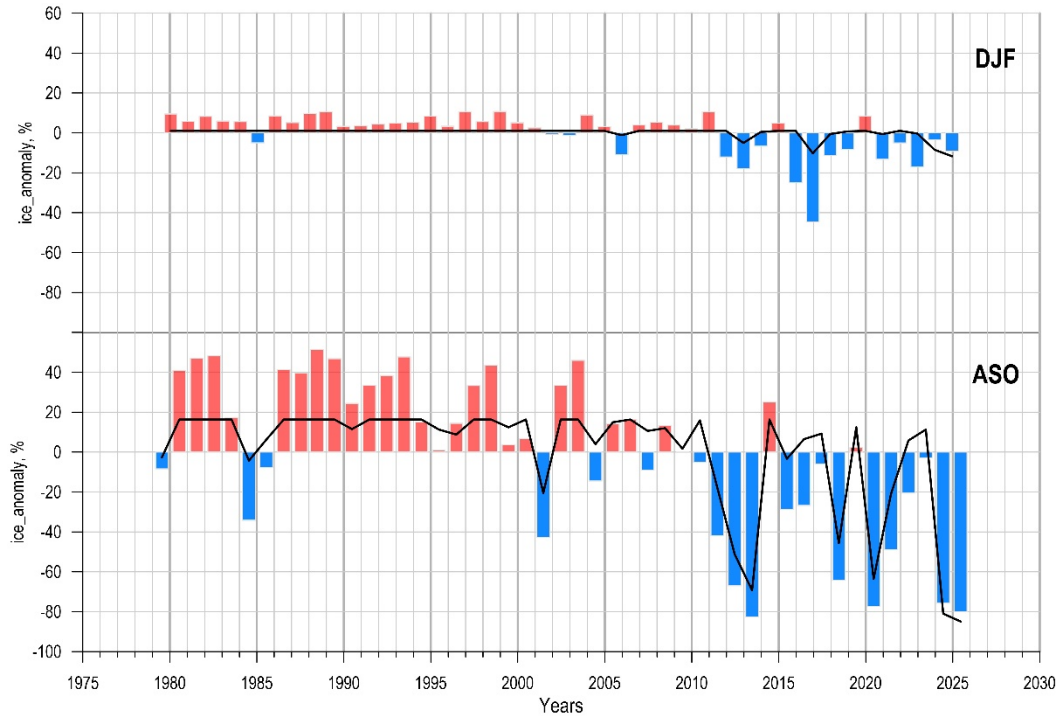
Временная изменчивость сплоченности ледяного покрова в районе СП-41 по данным микроволнового диапазона (радиометр AMSR-2 спутника GCOM-W1, алгоритм ASI) (<https://data.seaice.uni-bremen.de/>)



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

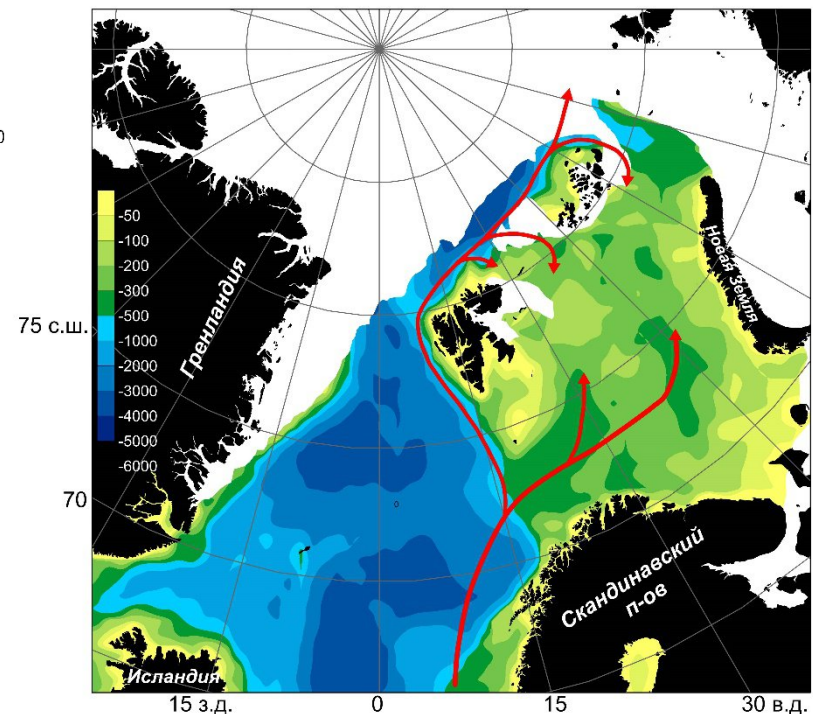


# Межгодовые изменения параметров ледяного покрова между Шпицбергом и Землей Франца Иосифа



Аномалии площади (цветные столбики) и протяженности (черные линии) ледяного покрова от средних значений за период 1979 – 2025 в западной части бассейна Нансена ( $81 - 83^\circ$  с.ш.,  $30 - 60^\circ$  в.д.) в декабре – феврале (DJF – сверху) и в августе – сентябре (ASO – снизу).

Положение границы ледяного покрова сплоченностью 1.5 балла 26 февраля 2016 г. (<https://icdc.zmaw.de/1/daten/cryosphere.html>). Схема переносов АВ показана красными стрелками. [Иванов и Ретина, 2018]



# Выводы

- ❑ Фаза сезонных колебаний меняется вдоль траектории АПТ в зависимости от времени адвективного переноса от пролива Фрама. Амплитуда колебаний температуры/солёности может превышать охлаждение/распреснение при перемешивании, вследствие чего в определенные моменты времени температура/солёность вниз по потоку АПТ оказывается выше, чем вверх по потоку.
- ❑ При расположении верхней границы АВ (нулевой изотермы) вблизи поверхности океана (что характерно для ранних зимних месяцев в районе к северу от ЗФИ) создаются необходимые предпосылки для реализации эффективного подвода тепла к нижней поверхности ледяного покрова. Экстремальная величина потока тепла из водной толщи к ледяному покрову может достигать первых сотен Вт/м<sup>2</sup>, что соизмеримо с потоком тепла с открытой водной поверхности в осенне-зимний сезон.
- ❑ Толщина стаявшего льда, рассчитанная по средней величине потока тепла из водной толщи в середине января 2024 г. (при условии, что все тепло тратится на таяние), хорошо 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 Шпицбергом 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.



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