

Влияние северных ветров на взлом льда и перенос арктических вод через Берингов пролив в зимний период

Жук В. Р., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН

Введение: водообмен через Берингов пролив

- Берингов пролив (БП) обеспечивает около 30% поступления пресной воды в Северный Ледовитый океан.
- Основной источник питательных веществ для арктических экосистем
- Обеспечивает поступление холодной воды зимой для гомогенизации верхних слоев Северного Ледовитого океана

Один из наиболее активно меняющихся путей в Арктику

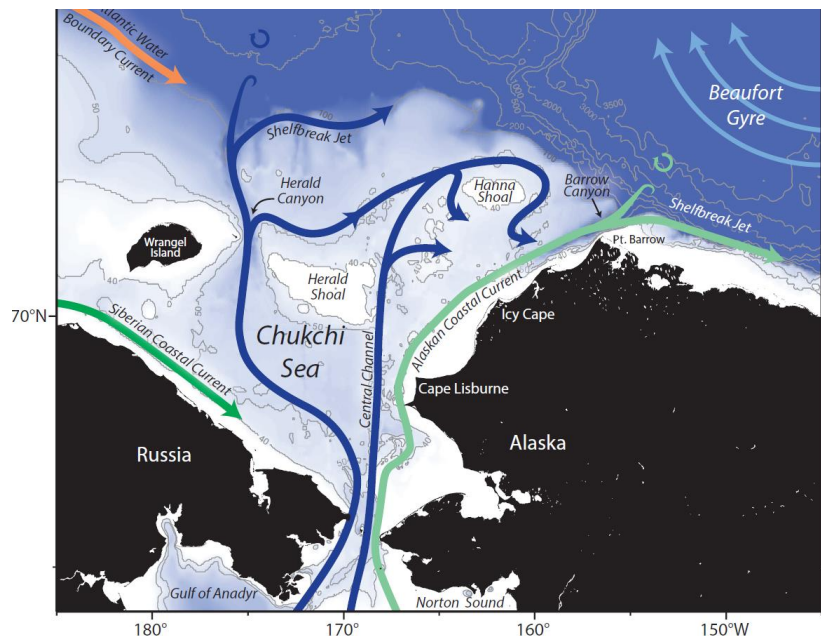
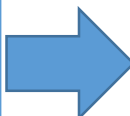


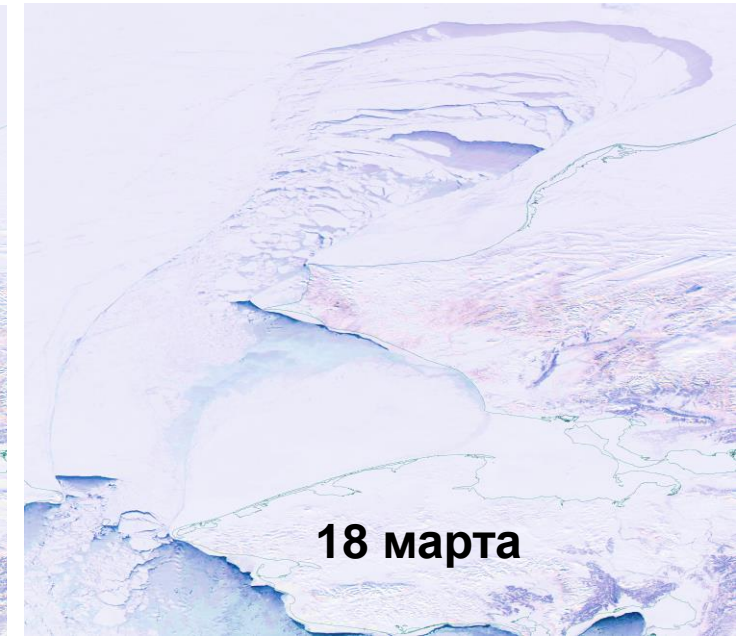
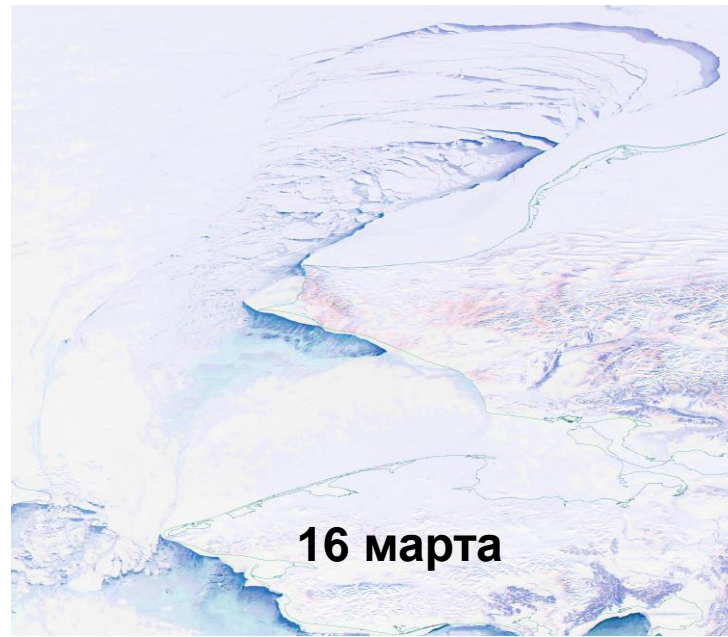
Схема основных течений в Чукотском море

Table 2. Whether record high (temperature, heat transport, liquid freshwater transport, and volume transport) or record low (salinity and solid freshwater transport) occurred in the 2010s, and whether there have been statistically significant trends. The absolute values of annual mean transports are considered when judging the record high and low. The results are based on synthesizing observations and model results for the past 5 decades. The reference salinity is 34.8 for freshwater transports, and the reference temperature is 0°C for heat transports. See also the discussion of ambiguities of heat and freshwater transports through open gateways in section 2.3.

	Salinity	Freshwater transport	Temperature	Heat transport	Volume flux
Record high or low in 2010s					
Bering Strait	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Barents Sea Opening	No ^a	No	Yes ^a	No	No
Fram Strait	Yes ^b	Yes	Yes ^a	Yes	No
Davis Strait	Yes ^b	Yes ^c	No ^a	Yes ^d	No
Fram Strait (sea ice)	/	Yes	/	/	/
Significant trend over the past 5 decades					
Bering Strait	No ^e	Yes ^f	Yes	Yes ^f	Yes
Barents Sea Opening	No ^{a,g}	No	Yes ^a	Yes	No
Fram Strait	Yes ^b	Yes	Yes ^a	Yes	No
Davis Strait	No ^b	No	Yes ^a	No	No
Fram Strait (sea ice)	/	Yes	/	/	/

Введение: Трещины в ледовом поле

- Образование трещин существенно меняет физические, химические и биологические процессы в системе «океан–атмосфера»
- Трещины во льду открывают прямой обмен океана и атмосферы, минуя барьер морского льда
- Когда лёд движется через узкий проход, он может «застрывать», образуя устойчивую конструкцию — так называемую ледяную арку.



Пример образования ледовых трещин в Чукотском море в 2012 г

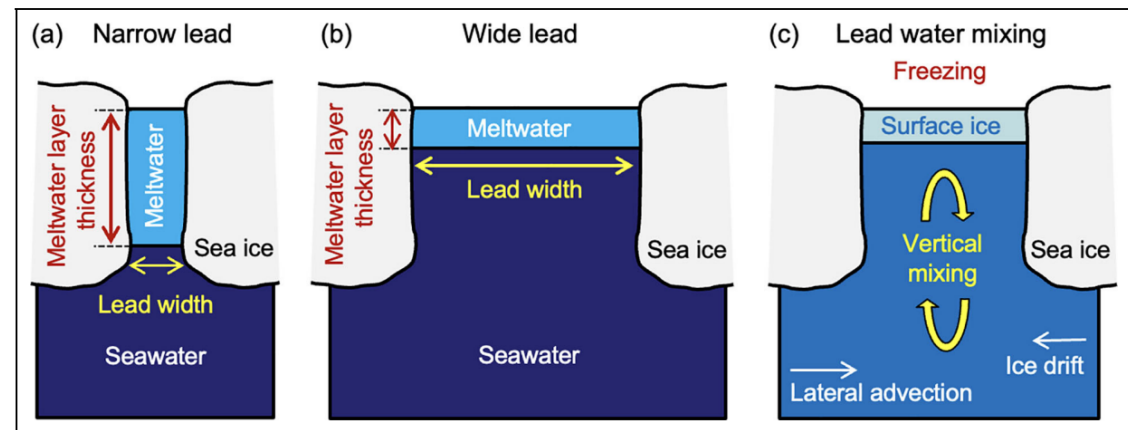


Figure 7. Schematic diagrams of the relationship between lead width and meltwater layer thickness. (a) When the lead is narrow, the meltwater layer is thick. (b) When the lead is wide, the meltwater layer is thin. (c) Schematic diagram of lead freezing and water mixing by lateral advection and ice drift. Nomura, D, et al. 2023.

Цель исследования

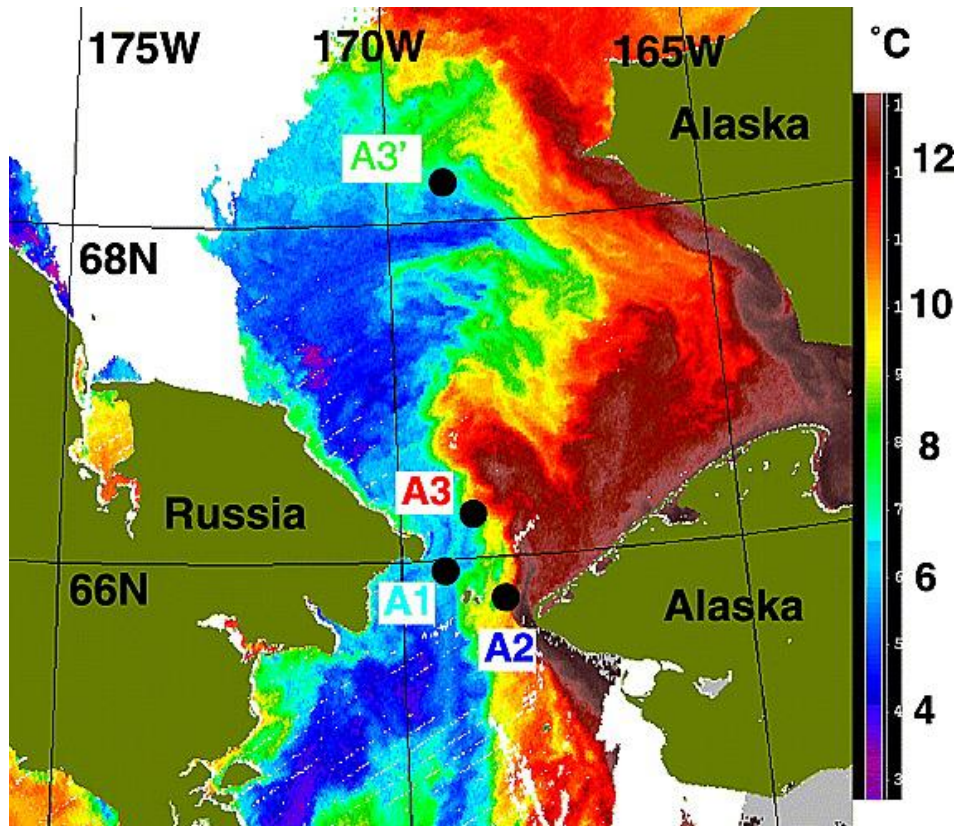
Исследование событий взлома ледового покрова и определение их взаимосвязи с транспортом льда и вод через Берингов пролив

Задачи исследования

1. Оценить влияние локального ветра на изменчивость водообмена между Чукотским и Беринговым морями в зимний период
2. Оценить изменчивость транспорта льда и площади открытых вод во время образования ледовых трещин
3. Параметризовать форму ледовых трещин
4. Определить межгодовую изменчивость количества событий южных затоков и экспорта льда через Берингов пролив во время образования ледовых трещин параболической формы

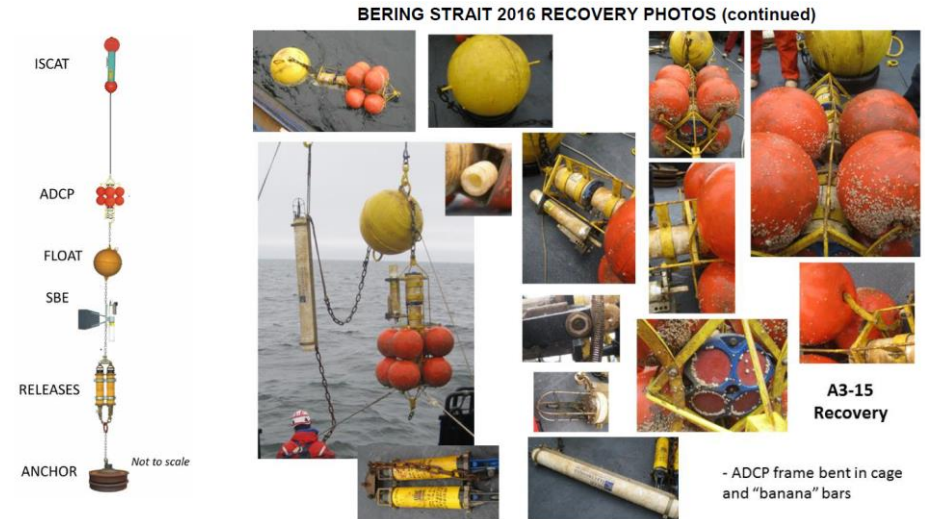
Заякоренные буи в Беринговом проливе (БП)

Здесь и далее все in-situ измерения брались в точке A3

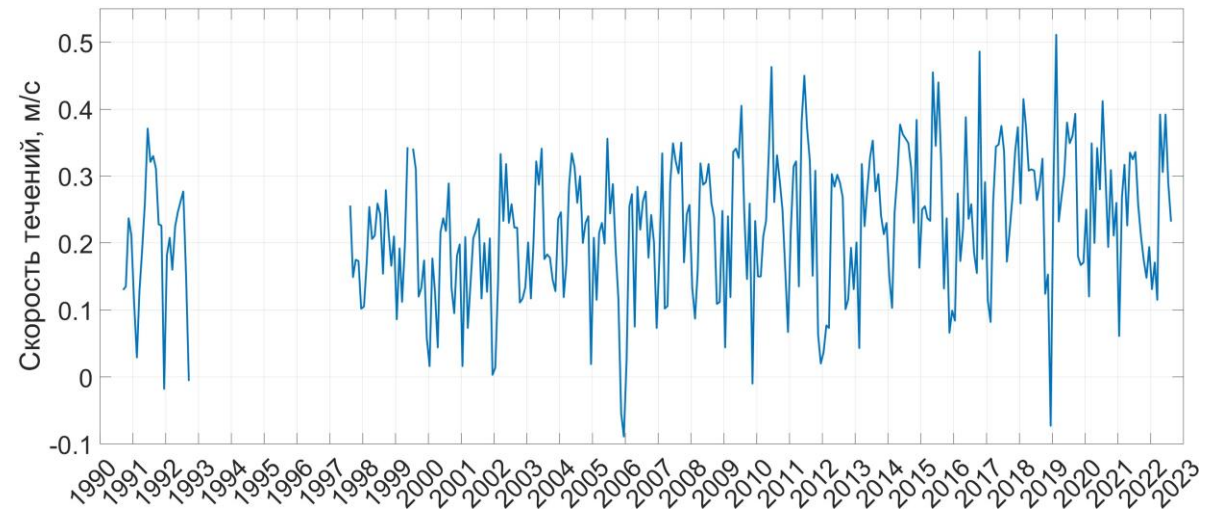


Изображение температуры морской поверхности (ТМП) с местами заякоренных измерителей отмеченными точками

<https://pscfiles.apl.uw.edu/woodgate/BeringStraitArchive>



Типичная конструкция измерителя в Беринговом Проливе с 2007 г. (не в масштабе) и восстановление измерителя A3-15 в 2016



Межгодовая изменчивость среднемесячной меридиональной компоненты скорости течений

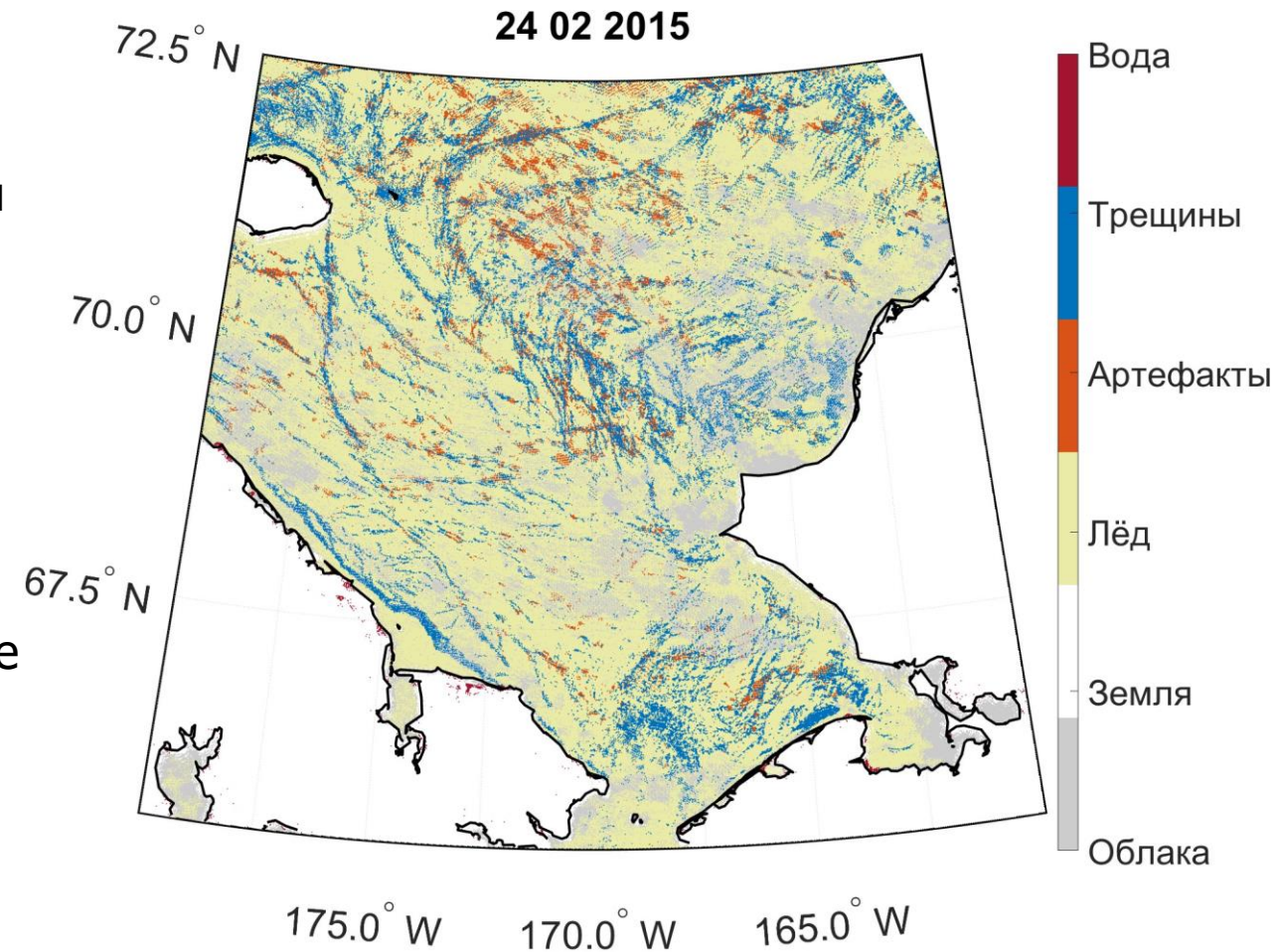
Данные

Параметр	Продукт/Спутник	Источник	Пространственное разрешение	Временное разрешение
Скорость течений, скорость дрейфа льда, сплоченность	GLORYS12v1	Copernicus	1/12°	1 день
Скорость ветра на высоте 10 м	Era-5/NCEP	Copernicus/NOAA	0,25°	1/6 ч
Скорость течений	In situ ADCP-измерители	https://pscfiles.apl.uw.edu/woodgate/BeringStraitArchive	2 м по глубине	30 минут

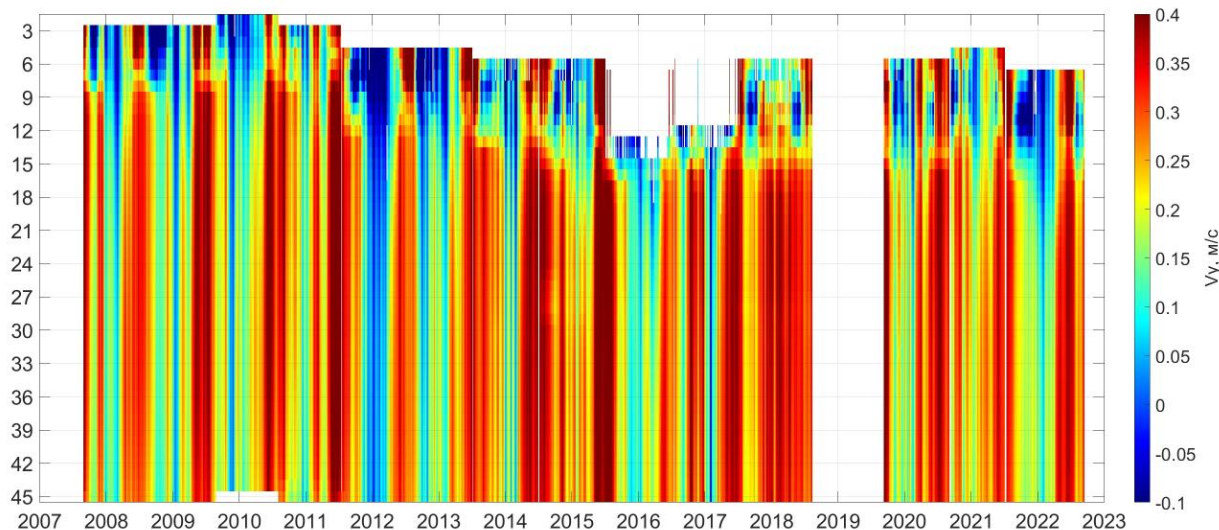
Использовались ежедневные карты ледовых трещин на основе данных MODIS с разрешением 1 км² ([Willmes et al., 2023](#)).

Карты отражают распределение шести классов: морской лёд, облака, артефакты, трещины, открытая вода и суша.

Методика классификации пикселей описана в работе Reiser et al. (2020).

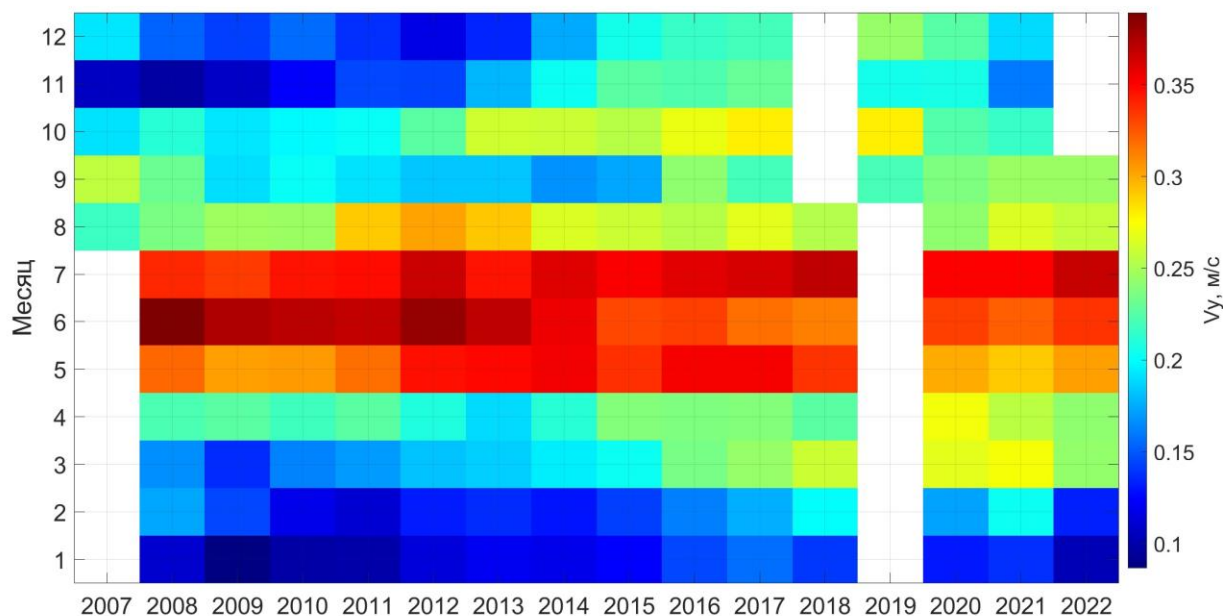


Межгодовая изменчивость течений в Беринговом проливе



- Значительные вариации скорости от -0,1 до 0,4 м/с

Профиль изменчивости меридиональной компоненты скорости течений в БП



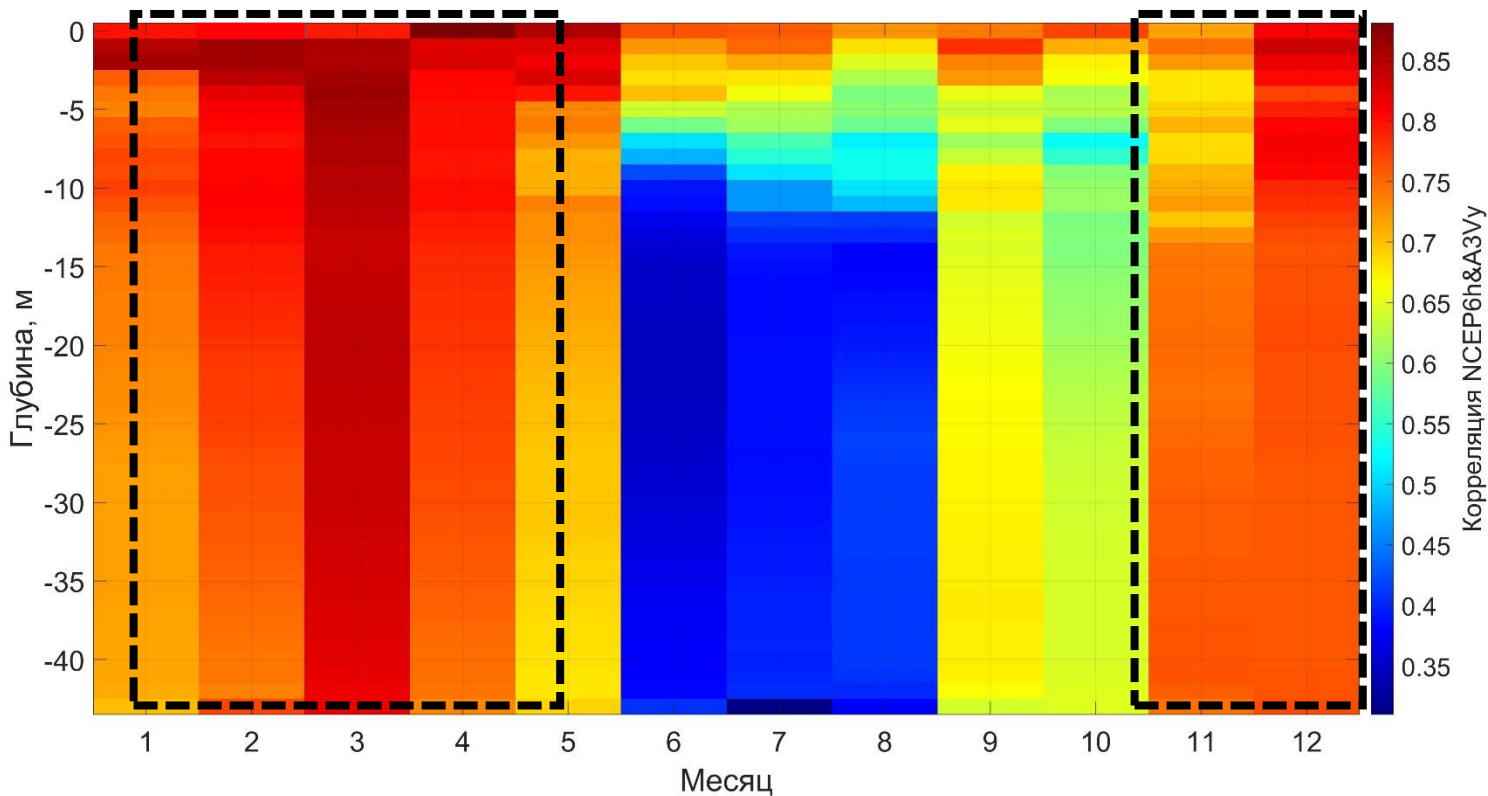
- Выраженная сезонная и межгодовая изменчивость
- Частое отсутствие данных на верхних горизонтах

Диаграмма средней меридиональной компоненты скорости течений в БП для каждого месяца и года

Ноябрь-май:

- Происходит баротропизация водного слоя
- Роль ветра возрастает, коэффициент корреляции достигает 0,7-0,8 по всей глубине

В зимний период роль ветра наиболее существенна



Сезонная изменчивость корреляции ветра в области над проливом и in situ течений в 2008-2022

Межгодовая изменчивость транспорта льда

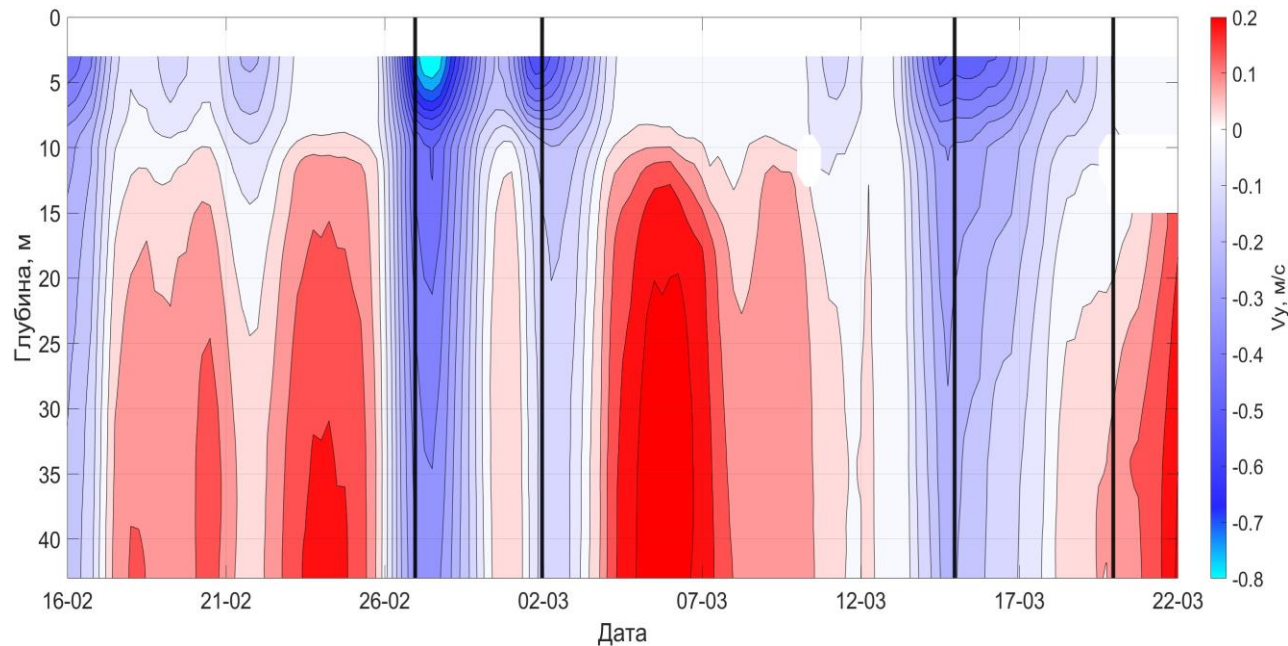
- В 2012 крупнейший вынос льда из Арктики в Тихий океан за последние 48 лет*



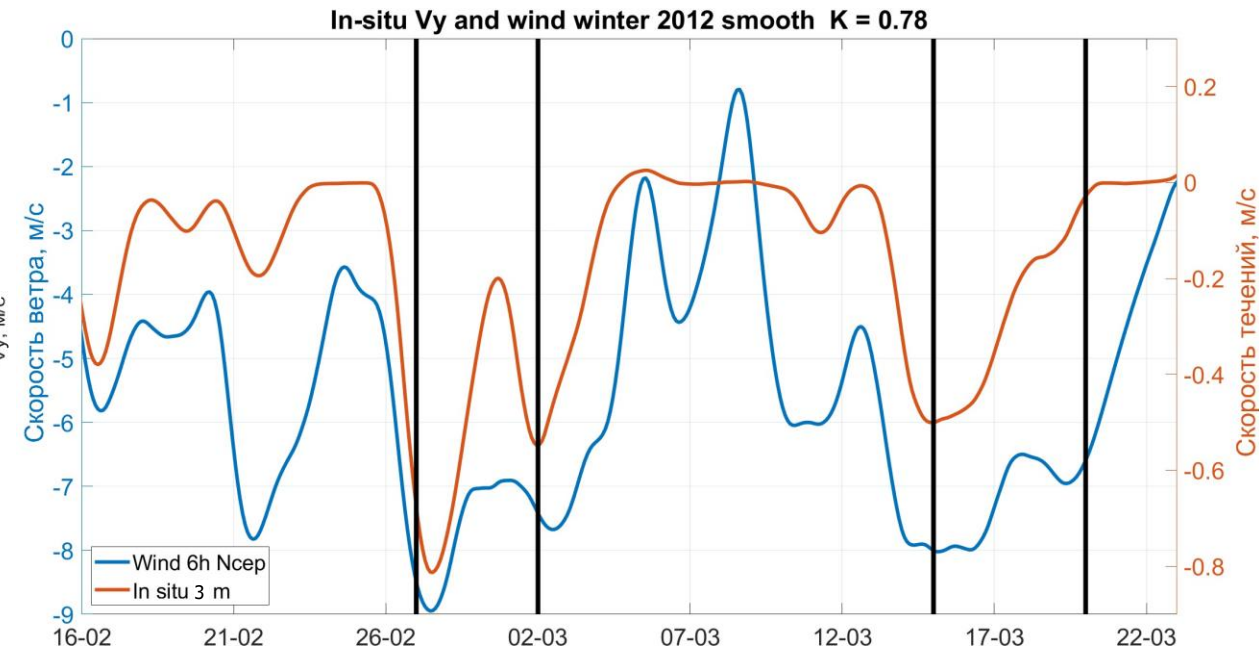
**Babb et al, 2013*
По спутниковым данным

Поток арктических вод в Тихий океан на примере 2012

- Анализ данных заякоренных измерителей ADCP и ветра показал сильную связь с $K = 0,78$.
- Резкие ослабления течений в зимний период происходят регулярно.

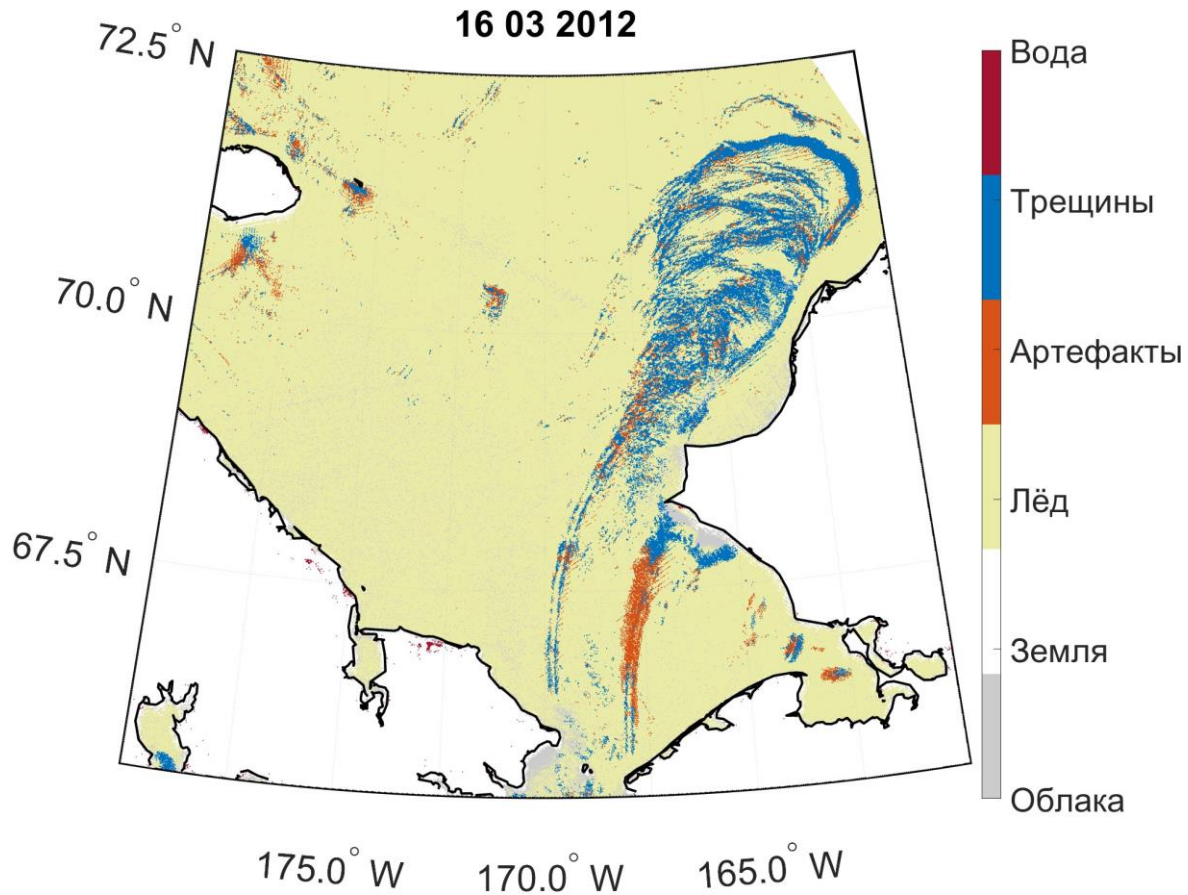


Профиль изменчивости меридиональной компоненты скорости течений в БП.
Черными линиями — периоды образования ледовых трещин



Изменчивость меридиональной компоненты скорости течений на горизонте 2 м и в БП и ветра, осредненная в области над проливом по данным реанализа NCEP.

Трансформация ледового поля на примере 2012



Пример наблюдаемых ледовых трещин параболической формы в Чукотском море в 2012 г по данным ([Willmes et al., 2023](#)) и прибора MODIS в оптическом диапазоне

Теоретическая модель: лёд как гранулированная среда

- Арка в таких системах описывается теорией, основанной на статическом анализе распределения напряжений (нормального и тангенциального):

$$\sigma_x = -p; \quad \tau_{xy} = -\gamma x$$

p — постоянное значение давления вблизи арки

γ — массовая сила на единицу площади

- Теория позволяет определить, сохраняется ли напряжённое состояние ниже критического уровня, достаточного для обрушения с помощью Критерия Кулона:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\varphi)$$

c — сцепление льда (Н/м),

φ — угол внутреннего трения.

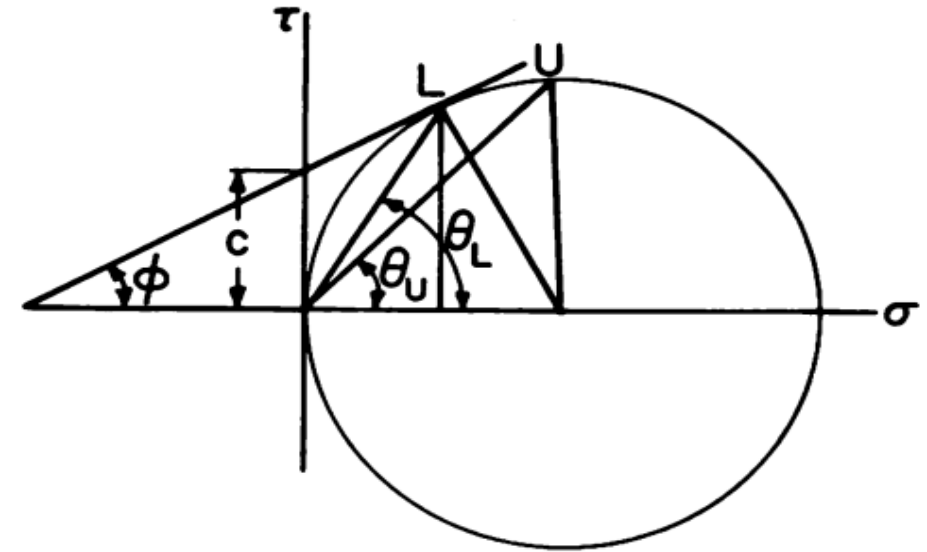


Figure 2. Mohr circle.

Впервые использовано для проливов в Арктике (Sodhi, 1977)

Форма ледовых арок

Форму ограничивающей арки можно получить с помощью окружности напряжений, показанной на рисунке 2.

θ - угол между горизонталью и касательной к свободной поверхности профиль свода описывается уравнениями:

$$\tan \theta = -\frac{dy}{dx} = -\frac{\tau_{xy}}{\sigma_x} = \frac{\gamma x}{p}$$

Интегрируя и принимая $y = 0$ при $x = \pm \lambda$ получаем параболическую форму ограничивающей дуги свода:

$$y = \frac{\gamma \lambda^2}{2p} \left[1 - \left(\frac{x}{\lambda} \right)^2 \right]$$

λ – полуширина ледовой арки
 p – нормальное напряжение давления
 γ – напряжение трения ветра
 y – широта
 x – долгота

$$\gamma = r * D * v^2$$

r – приземная плотность воздуха
 D – коэффициент трения
 v – скорость ветра

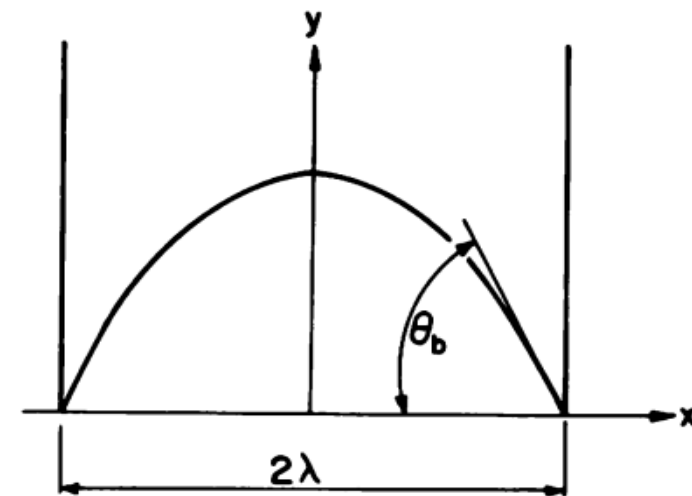


Figure 1. Free arch.

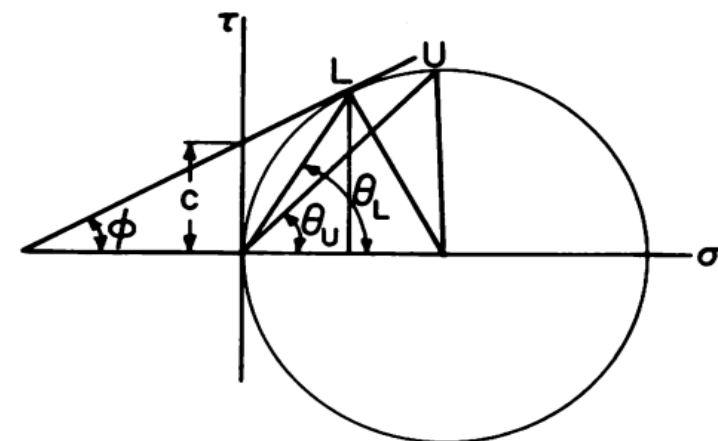


Figure 2. Mohr circle.

События выноса льда в 2012: параметризация трещин

- Форма трещин задаётся (Sodhi, 1977):

$$y = \frac{\gamma \lambda^2}{2\rho} \left[1 - \left(\frac{x}{\lambda} \right)^2 \right]$$

λ – полуширина ледовой арки

ρ – нормальное напряжение давления

γ – напряжение трения ветра

y – широта

x – долгота

$$\gamma = r * D * v^2$$

r – приземная плотность воздуха

D – коэффициент трения

v – скорость ветра

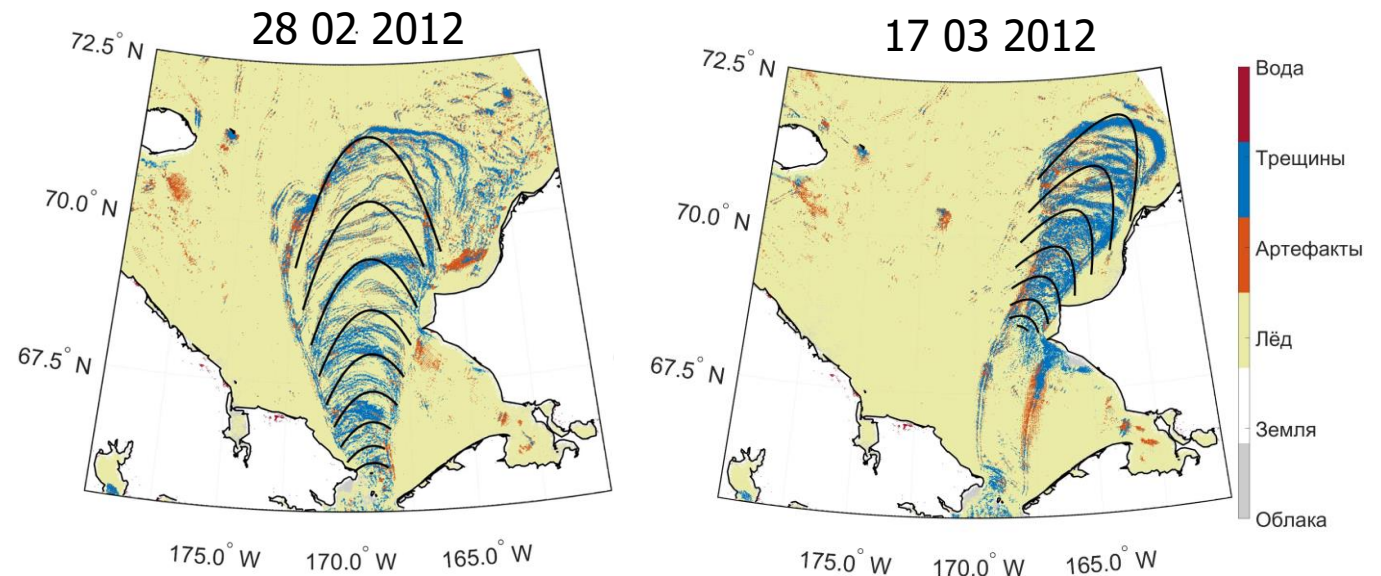
При построении использовались следующие значения параметров:

$D = 0,001$;

$r = 1,3943 \text{ кг/м}^3$;

$v = 7,8 \text{ м/с}$;

$\rho = 3000 \text{ Па}$.



Карты ледовых трещин по размеченным данным. Черными линиями показана параметризованная форма трещин.

Определение угла трения

Угол θ соответствует для нижней границы

$$\theta_L = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \quad (\text{нижняя граница})$$

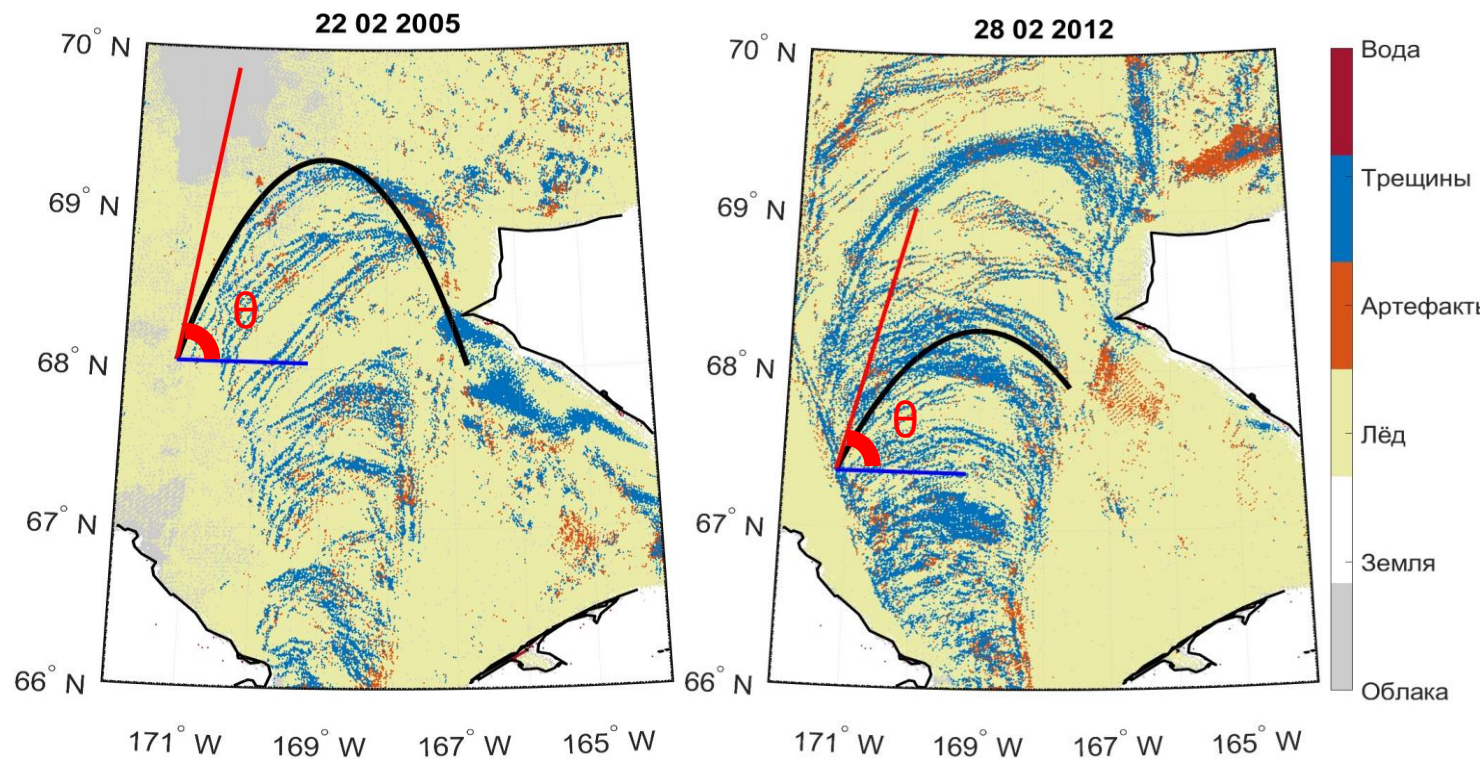
Ограничения:

- Арка должна быть примерно симметричной.
- Должна быть видна геометрия дуги

Пример:

Для ледовой арки в районе Берингова пролива
угол θ составлял:

- $78,5^\circ$ в 2005 году
- 67° в 2012 году



Эти значения соответствуют углам трения:

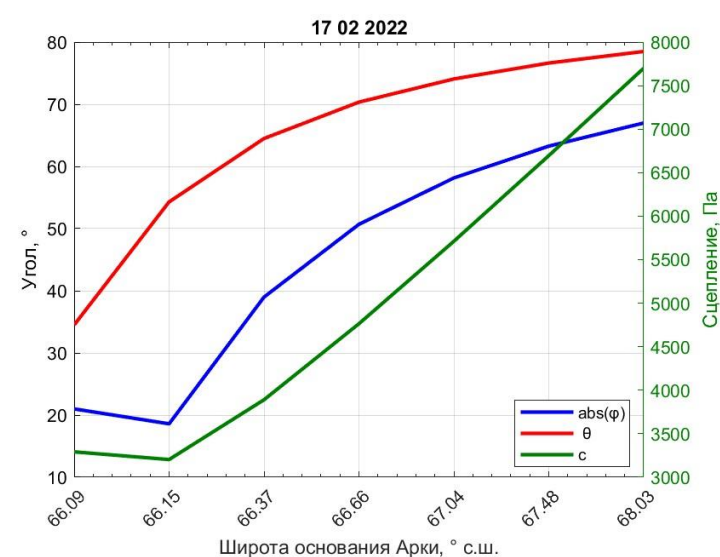
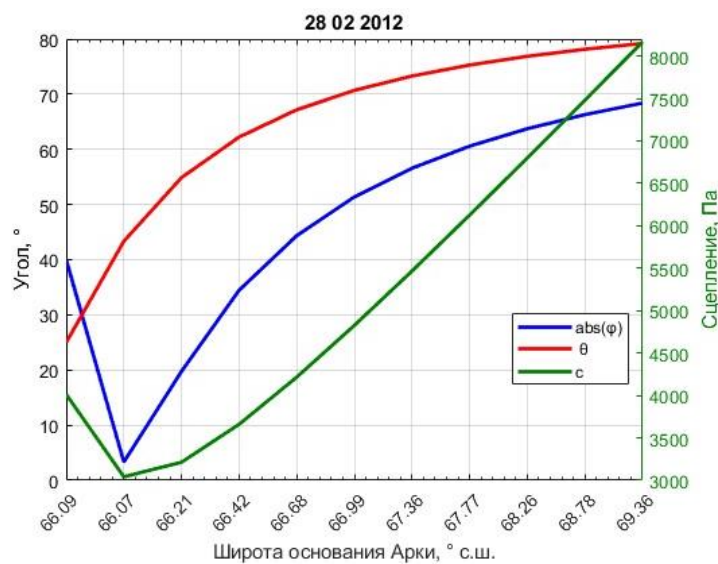
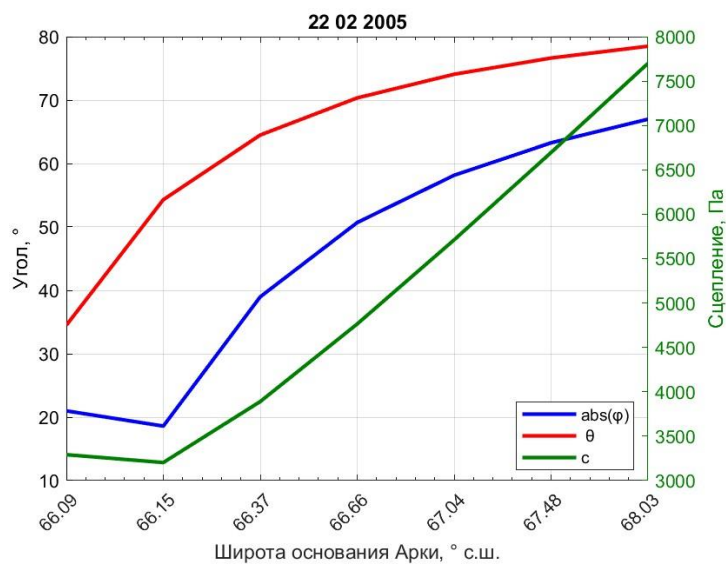
- 67° в 2005 году
- 51° в 2012 году

Сцепление в ледовых арках

Для нижней границы: $\lambda_L = \frac{c (1 + \sin\phi)}{\gamma} \rightarrow c = \frac{\gamma \lambda_L}{(1 + \sin\phi)}$

С увеличением широты сцепление увеличивается. Это связано с тем, что угол θ (красная линия) также растёт — арки становятся более «открытыми», и для устойчивости требуется большее сцепление.

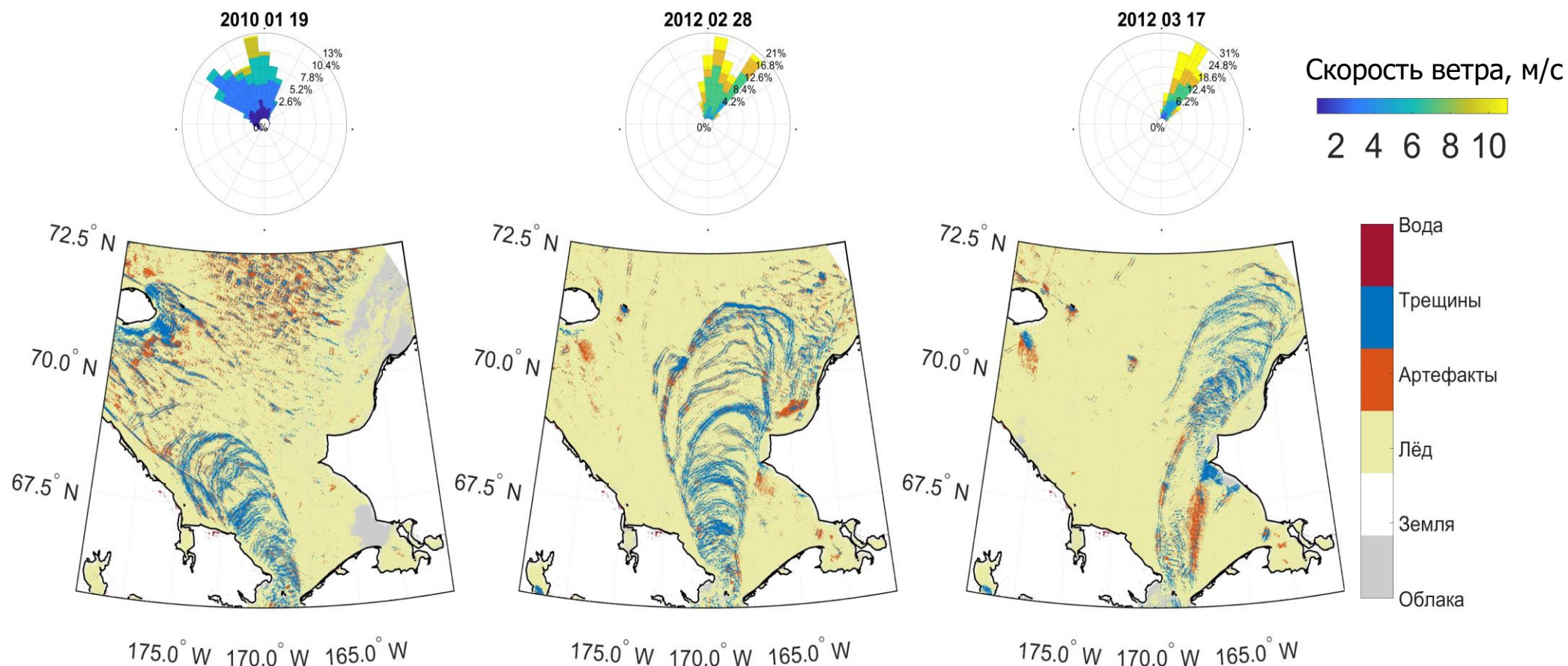
Максимальное сцепление — около 8000 Па наблюдается на северных широтах для центральных арок.



Рассчитанные по спутниковым данным параметры ледового поля

Влияние направления ветра на формирование трещин

Формирование трещин параболической формы происходит при силе ветра более 5,6 м/с*. Местоположение области трещин зависит от изменчивости направления северного ветра.

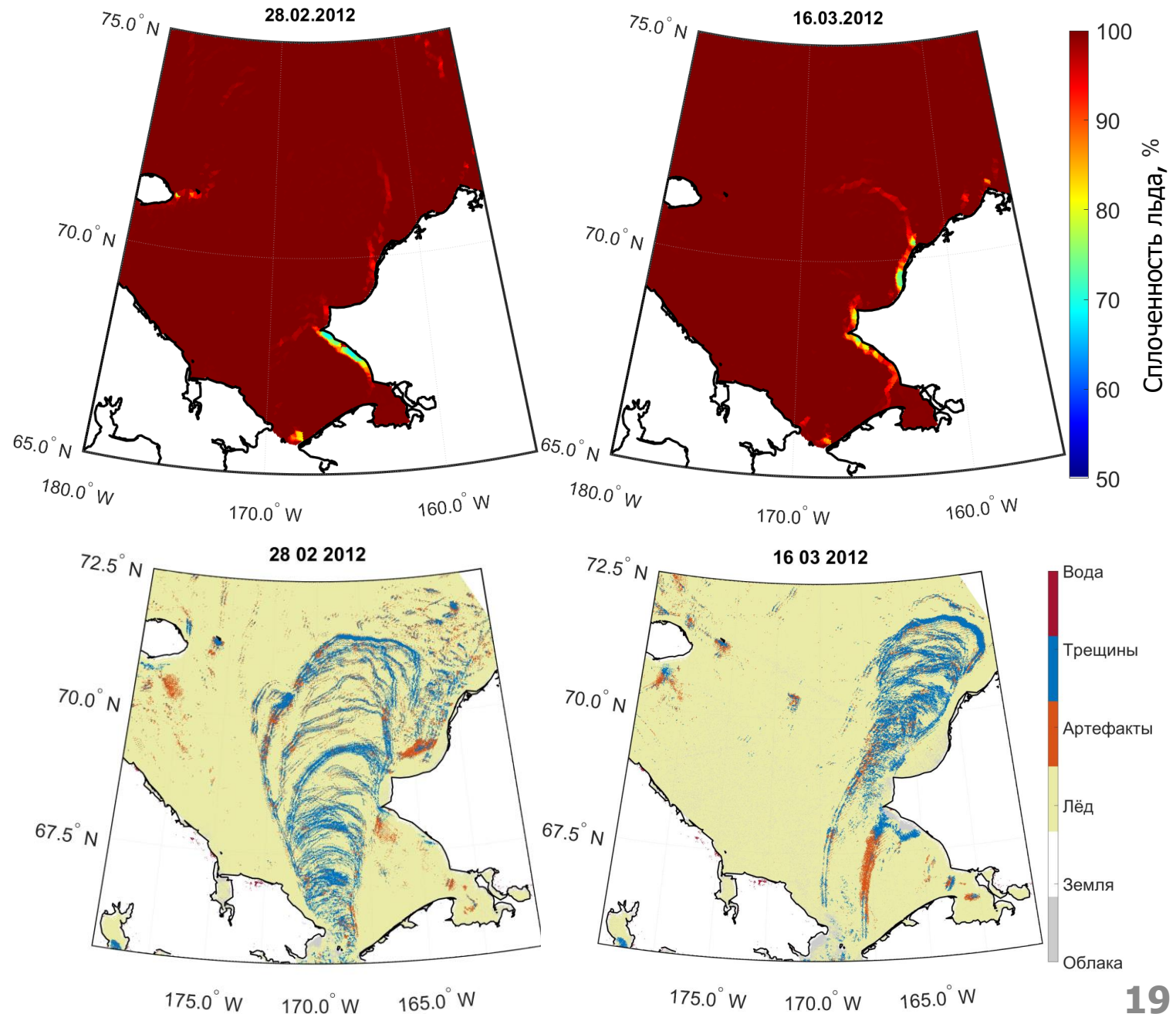


Ежедневные розы ветров в области 164 – 176 °з.д. 66-72 °с.ш.(сверху).
Карты размеченных трещин на основе измерений MODIS (снизу)

*(Sodhi, 1976)

Модель neXtSIM и трещины во льду

- Модель NEXTSIM создавалась для воспроизведения ледовых трещин, но не отражает весь их набор, наблюдаемый со спутника.



События выноса льда в 2012: транспорт льда, площадь открытой воды

- Транспорт льда во время событий выноса в южном направлении увеличивается до 1,5 тыс. км²
- Площадь открытой воды с момента начала выноса повышается на 1-2,5 тыс. км²

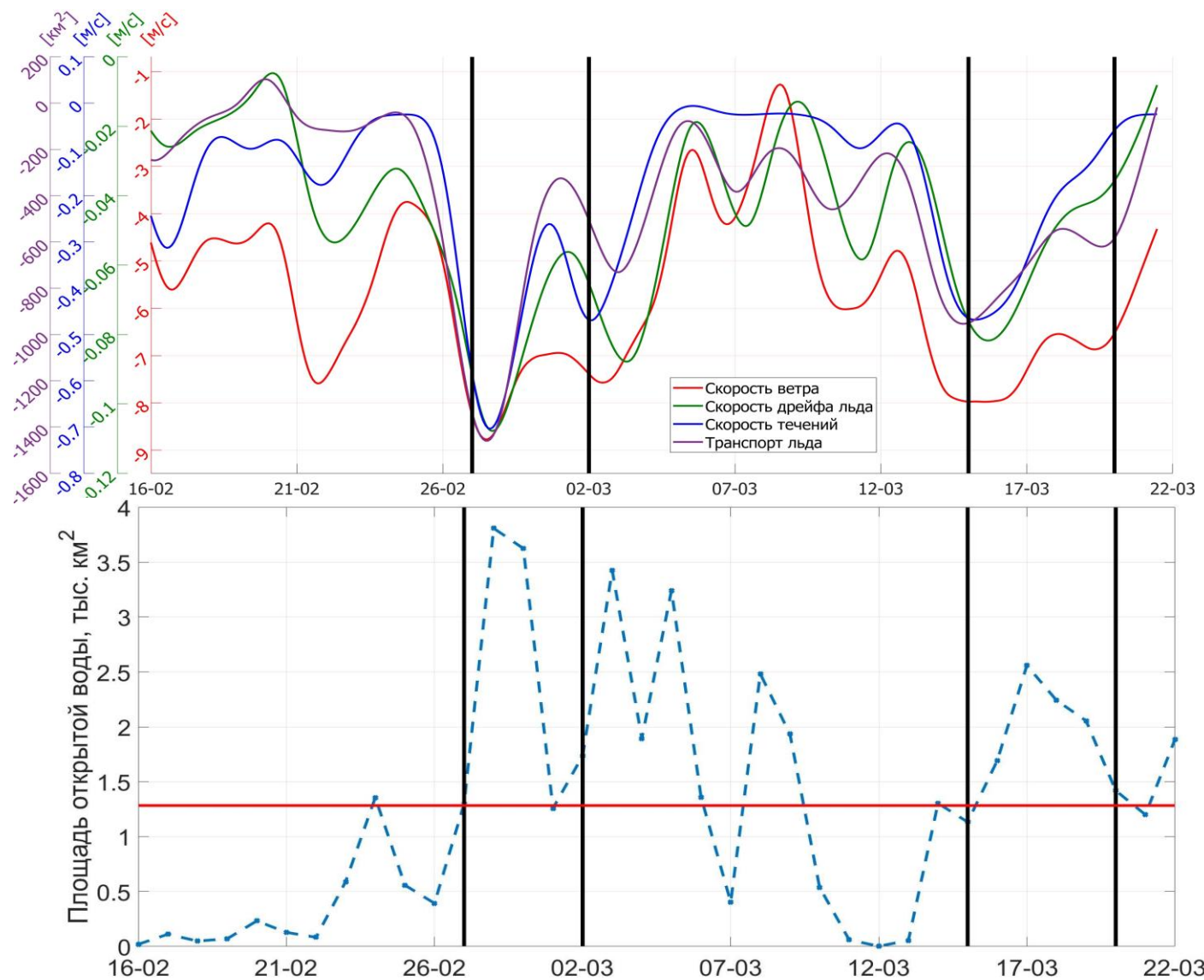
Транспорт льда – F:

$$F = C * L * V$$

C – средняя сплочённость льда

L – ширина БП

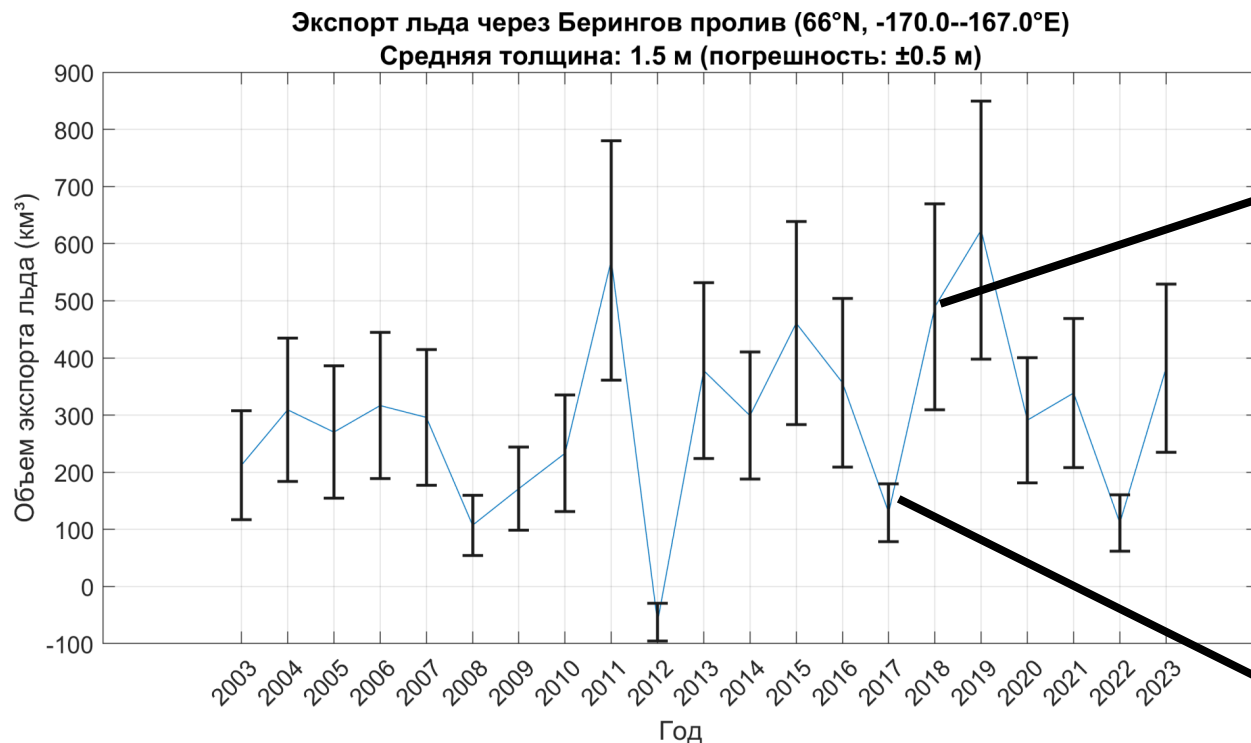
V – средняя скорость дрейфа льда



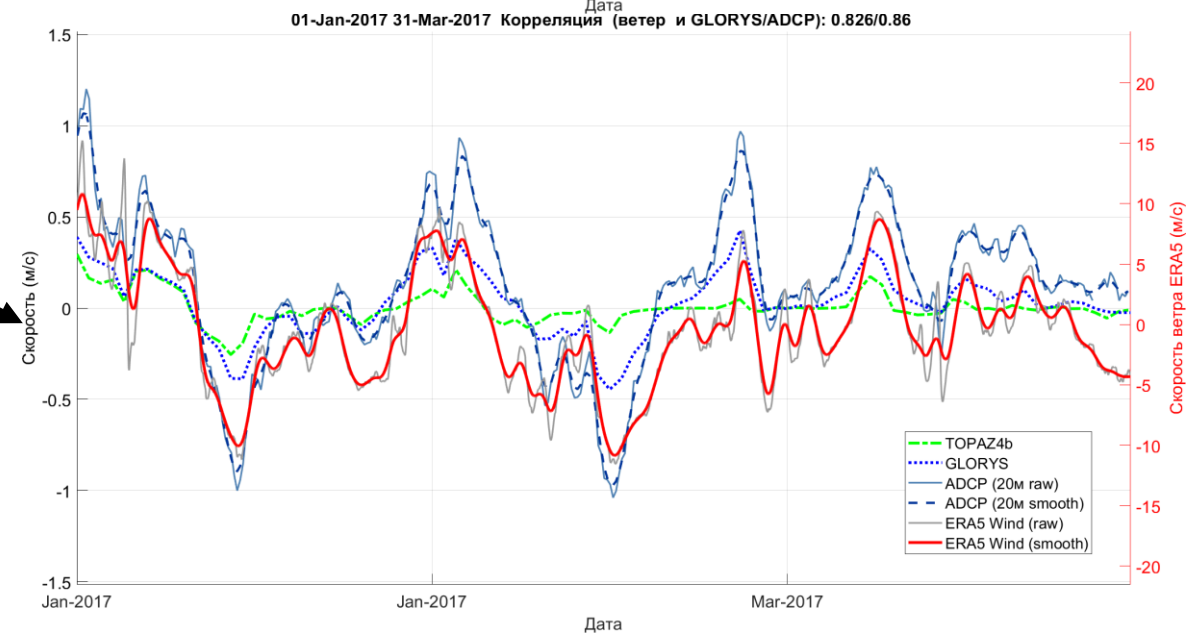
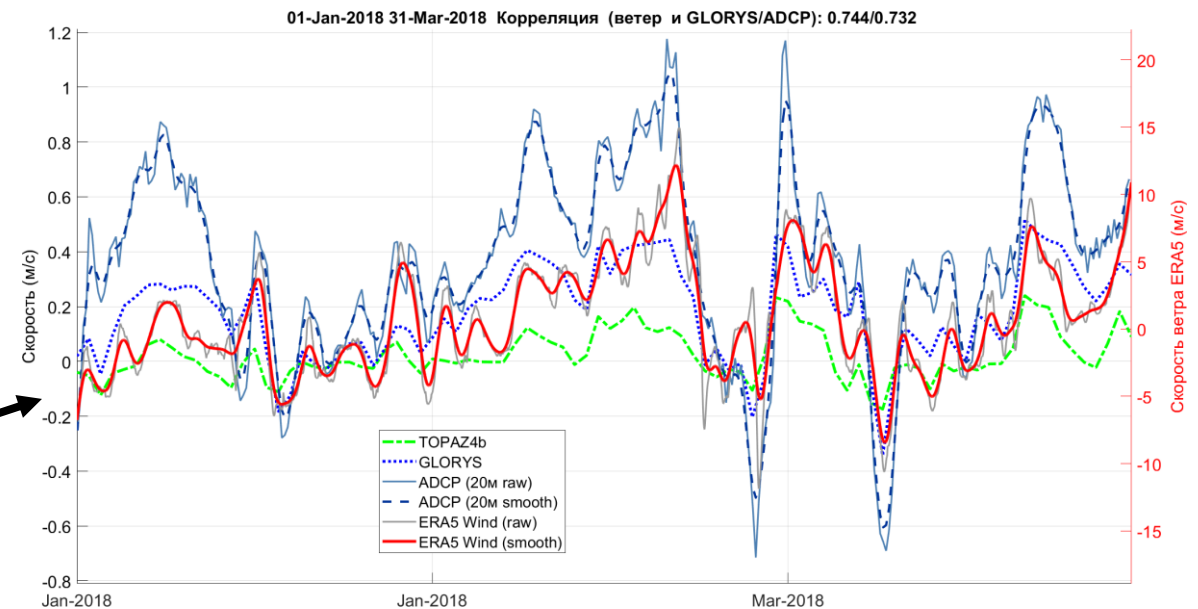
Изменчивость скоростей ветра, дрейфа льда, течений и ледового транспорта (сверху). Изменчивость площади открытой воды, осредненная в области (снизу). Красная линия обозначает среднюю площадь открытых вод в зимний период.

Межгодовая изменчивость транспорта льда

- Суммарный экспорт льда зависит от многих факторов
- Формирование и обрушение параболических трещин – один из них

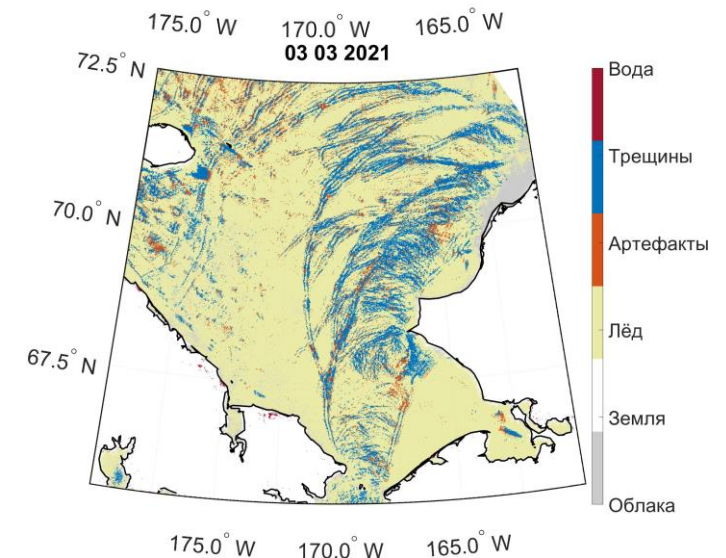
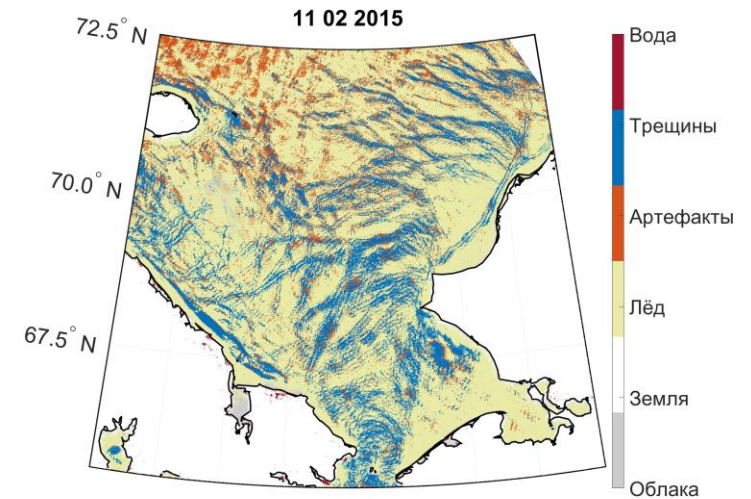
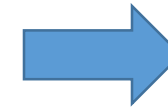
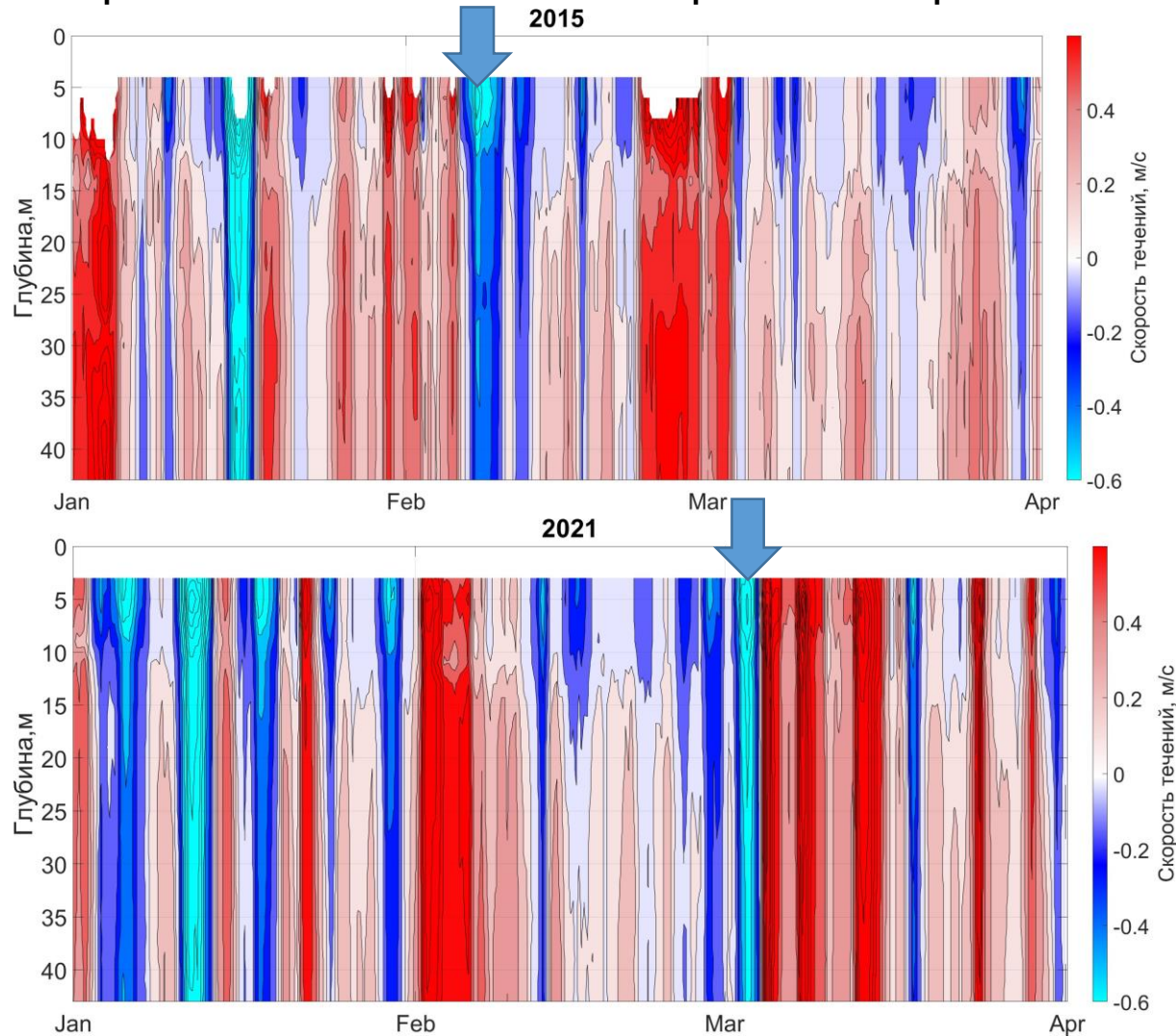


Межгодовая изменчивость суммарного экспорта льда в Беринговом проливе с января по март



Определение пороговых значений

Наиболее обширные ледовые трещины наблюдаются при ветрах северных румбов более 7 м/с и скорости южного течения в Беринговом проливе на горизонте 15 м более 0,14 м/с

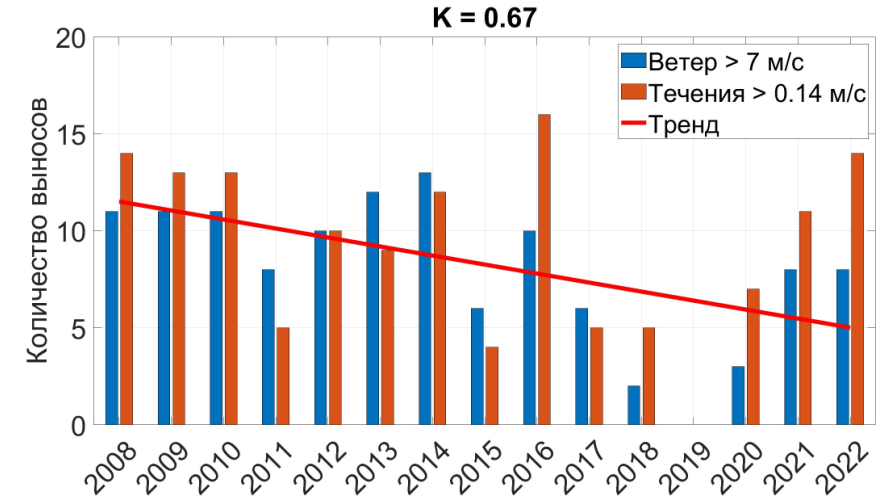


Профиль изменчивости меридиональной компоненты скорости течений в БП.

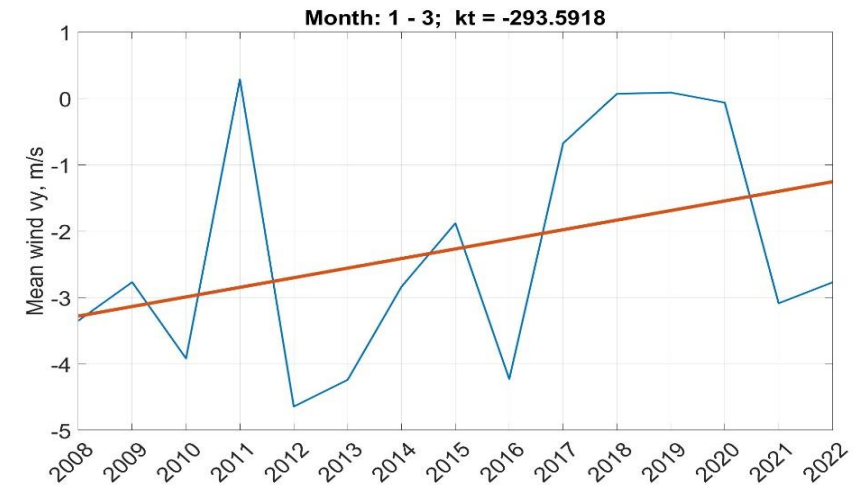
Карты размеченных трещин на основе измерений MODIS

Межгодовая изменчивость событий затоков Арктических вод

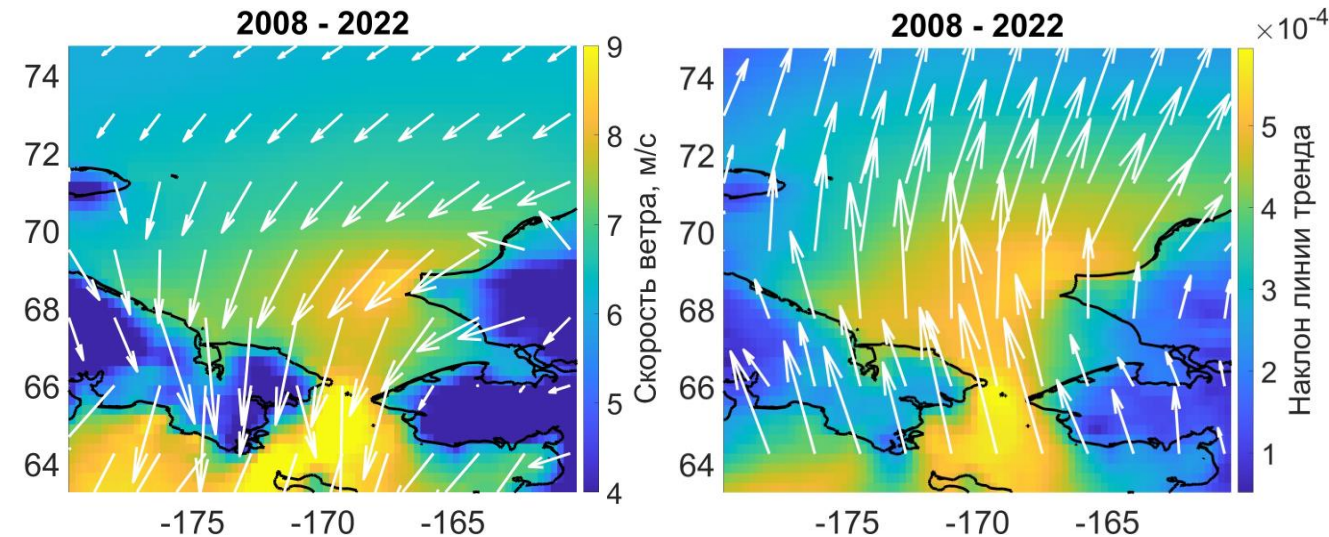
- Наблюдается уменьшение количества выносов с 2008 по 2022 г.
- В зимний период в Чукотском море преобладают северные ветра. Причиной уменьшения количества выносов является их ослабление: с 2008 г наблюдается положительный тренд южных ветров в зимний период в области БП.



Межгодовая изменчивость выносов, определенных пороговыми значениями скоростей ветра и течений в БП



Межгодовая изменчивость средней в области меридиональной компоненты ветра над Чукотским морем, осредненная с января по март



Скорость ветра, осредненная для января-марта (слева) и пространственное распределение наклона линии тренда ветра (справа), в 2008-2022

Заключение

- В зимний период местный ветер (корреляция $K > 0,7$) играет ключевую роль в водообмене между океанами, вызывая смену направления течений в Беринговом проливе с северного на южное при интенсификации северных ветров.
- Особенности морфологии южной части Чукотского моря и воздействие сильных северных ветров приводят к резкой перестройке ледовых полей, где перенос льда в Беринговом проливе аналогичен движению гранулированного материала через сужающийся канал.
- При достижении критических значений напряжений в ледовых полях возникают трещины, форма которых определяется соотношением тангенциального и нормального напряжений. Проведена параметризация формы трещин и определены значения сцепления льда, угла внутреннего трения в зависимости от широты.
- Во время событий перестройки ледовых полей площадь открытой воды в районе Берингова пролива увеличивается более чем в 2 раза, причем местоположение трещин зависит от направления ветра.
- Слом льда и южные течения в проливе вызывают резкий вынос льда из Чукотского моря в Тихий океан. На основе пороговых значений скорости течений и ветра установлена межгодовая изменчивость событий выноса льда в предпроливной области Чукотского моря. Уменьшение количества событий выноса льда в последние десятилетия связано с ослаблением северных ветров над Беринговым проливом

An aerial photograph of a coastal region. The central part of the image is dominated by a large, dark blue body of water, possibly a bay or a large lake. To the left and right of this central water body are landmasses with a mix of green and brownish-yellow colors, indicating vegetation and possibly some urban or developed areas. The coastline is irregular, with several small inlets and peninsulas. The overall lighting is somewhat dim, giving the image a slightly somber or dramatic feel.

Спасибо за внимание!