



Особенности генерации и распространения короткопериодных внутренних волн в море Содружества по данным дистанционного зондирования

Бакуева Я.И.¹ ✉, Козлов И.Е.¹

¹ *Морской Гидрофизический Институт РАН, г. Севастополь, Российская Федерация*

✉ yasya1egupova@gmail.com

Актуальность работы

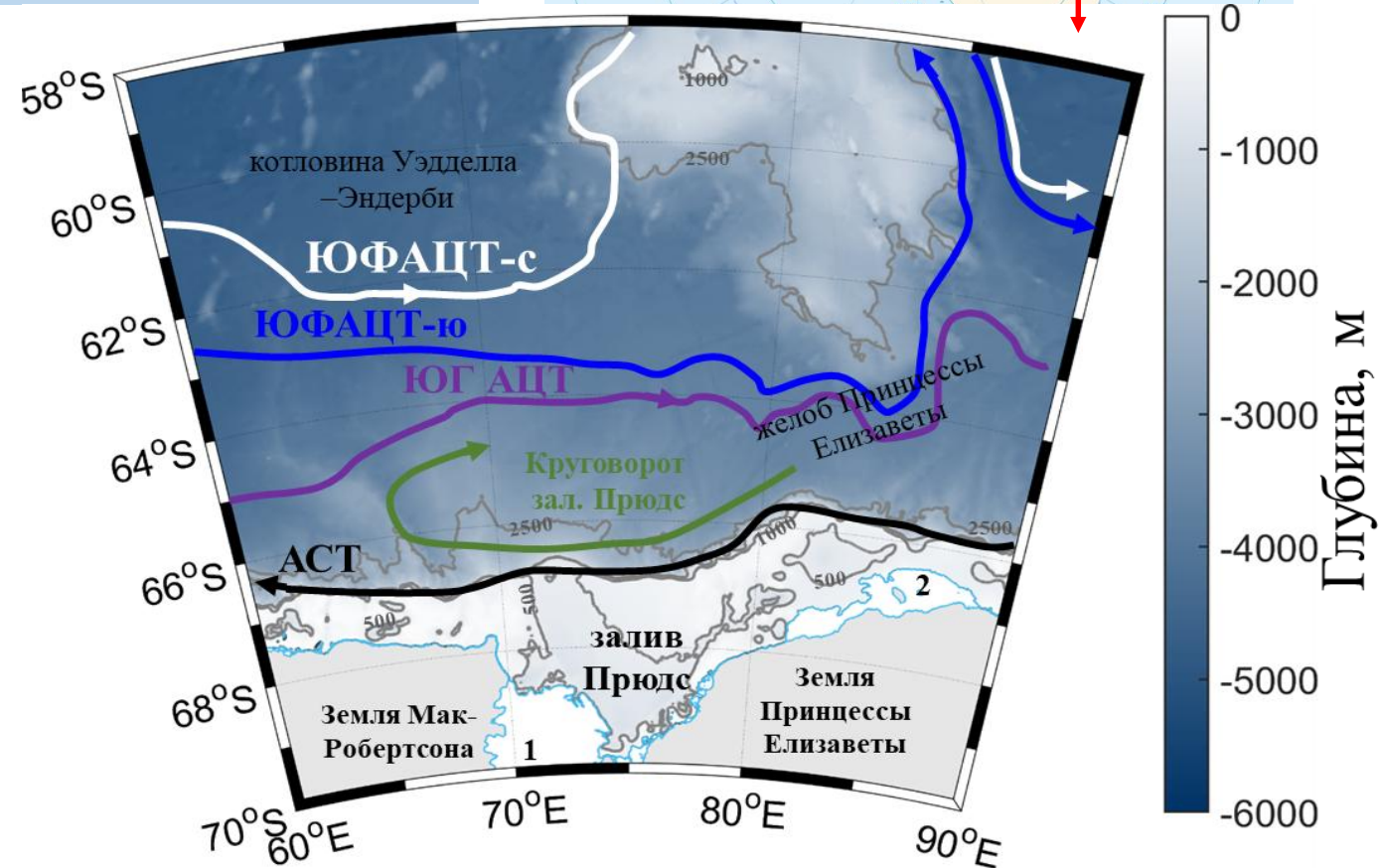
- Море Содружества является одним из шести значимых районов-источников плотных шельфовых вод, участвующих в образовании Антарктических донных вод Южного океана.
- Шельф моря Содружества открыт ото льда в теплый период года, а также характеризуется наличием постоянных зон интенсивных геострофических течений (меандров АЦТ) в глубоководной части акватории.
- Недостаточная изученность: Поле короткопериодных внутренних волн (КВВ) в Южном океане является фактически неизученным. Основная информация доступна только о внутренних волнах приливного и инерционного периодов.
- Влияние на вертикальный обмен и биопродуктивность: КВВ способствуют вертикальному перемешиванию, влияя на доступность питательных веществ в эуфотической зоне, биопродуктивность и распространение видов в Южном океане.
- Потенциальная опасность для морских операций: КВВ могут оказывать влияние на подводную навигацию и акустику, прибрежную инфраструктуру в Антарктике и Субантарктике.

Цель работы

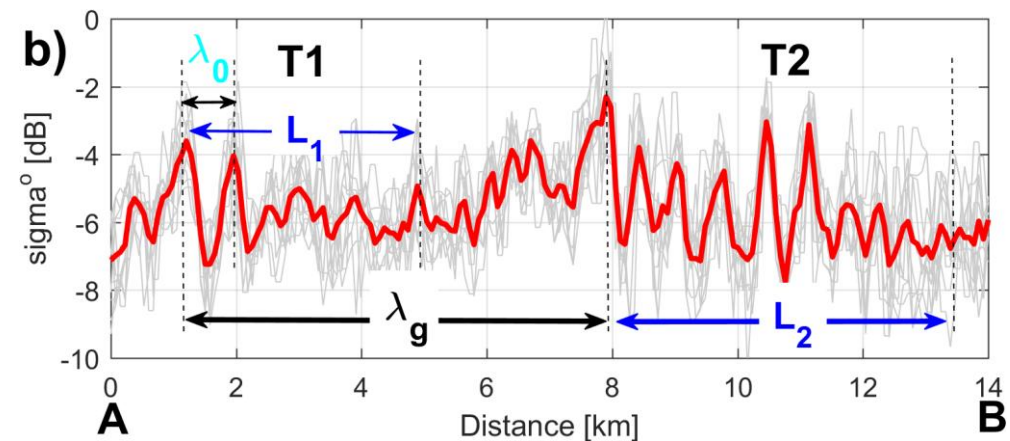
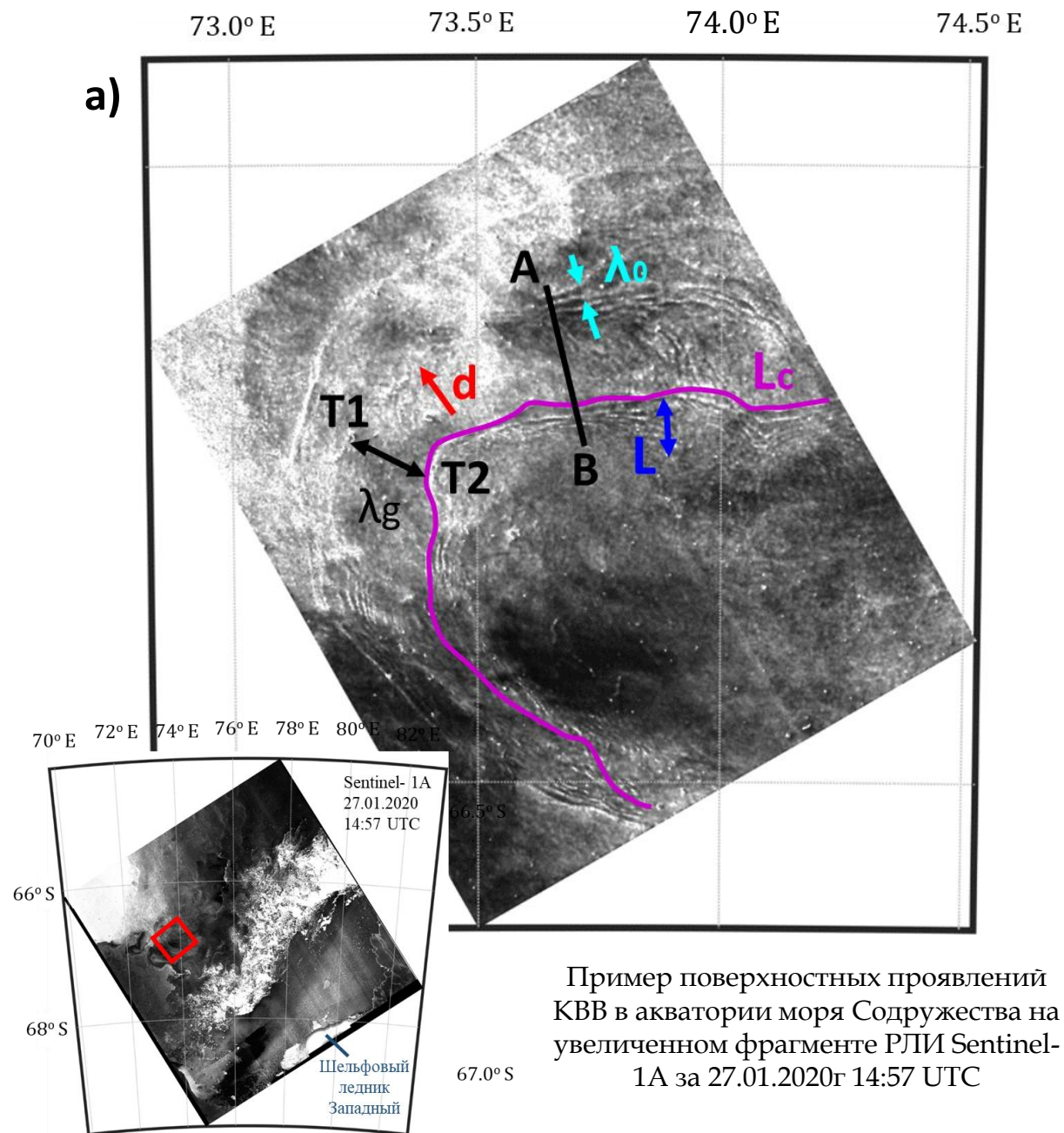
Исследование характеристик КВВ на акватории моря Содружества на основе анализа спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) Sentinel-1 А/В

Задачи работы:

- Формирование базы спутниковых РЛИ района исследований
- Идентификация поверхностных проявлений КВВ
- Определение ключевых районов генерации КВВ
- Определение пространственно-временных характеристик КВВ - длины и ширины волновых пакетов, направления их распространения, а также фоновых приливных условий в момент регистрации КВВ.
- Определение механизмов генерации КВВ



Данные и методы: обработка спутниковых данных



Визуальная идентификация и определение параметров КВВ:

- длина волны в пакетах ВВ;
- длина гребня лидирующей волны;
- количество волн в пакетах;
- площадь и ширина пакетов;
- направление распространения ВВ;
- расстояния между последовательными пакетами;
- величина модуляции РСА-сигнала проявлением ВВ;
- фоновая скорость и направление ветра;
- геометрия РСА-наблюдений;
- глубина места;
- **фазовая скорость ВВ.**

Данные и методы: набор данных

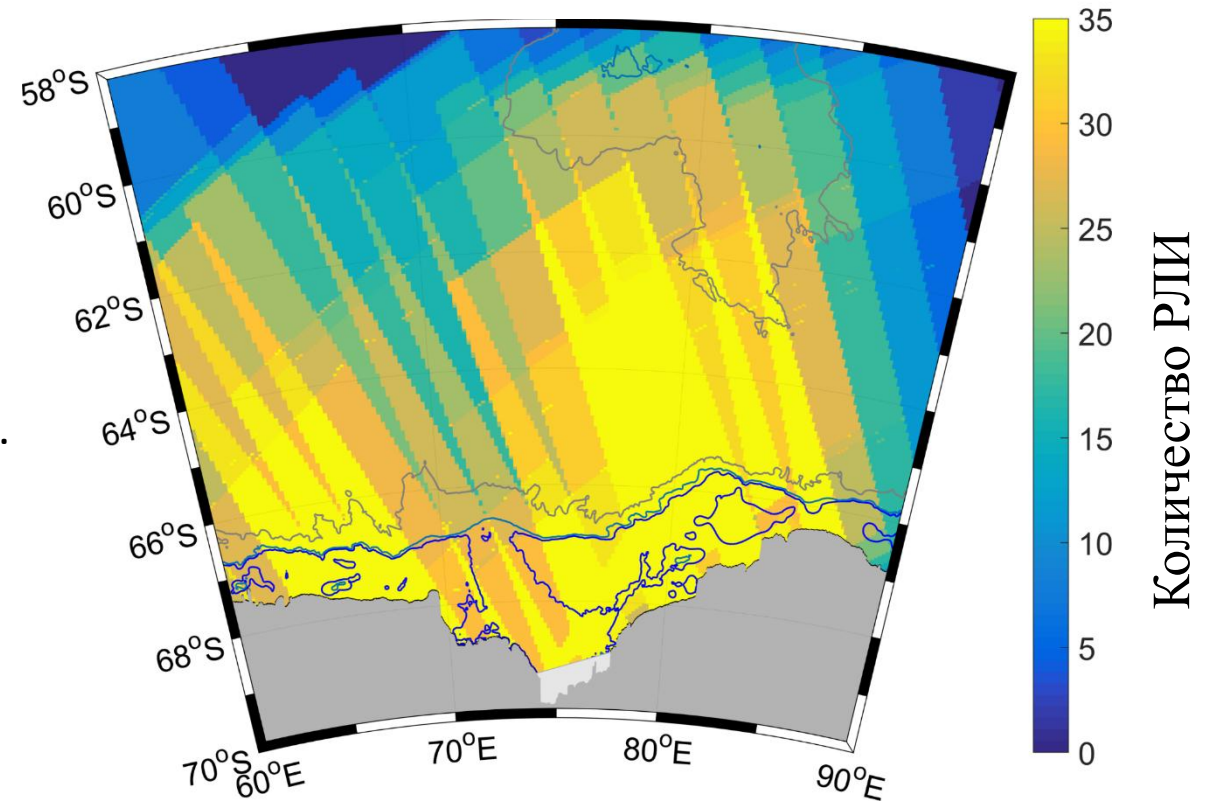
Данные:

- Спутниковые изображения радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 A/B (<https://scihub.copernicus.eu>);
- Поля приливных течений TPXO9-atlas-v5 (<https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas>);
- Полях геострофических течений AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>);
- Батиметрические данные IBCSO v.2 [Dorschel B. et al. The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean Version 2 // Scientific Data. – 2022. – Т. 9. – №. 275. – P. 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01366-7>].
- Данные температуры и солености WOA23 (<https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-atlas>)

Период: январь - март 2020 г. , **611 РЛИ**.

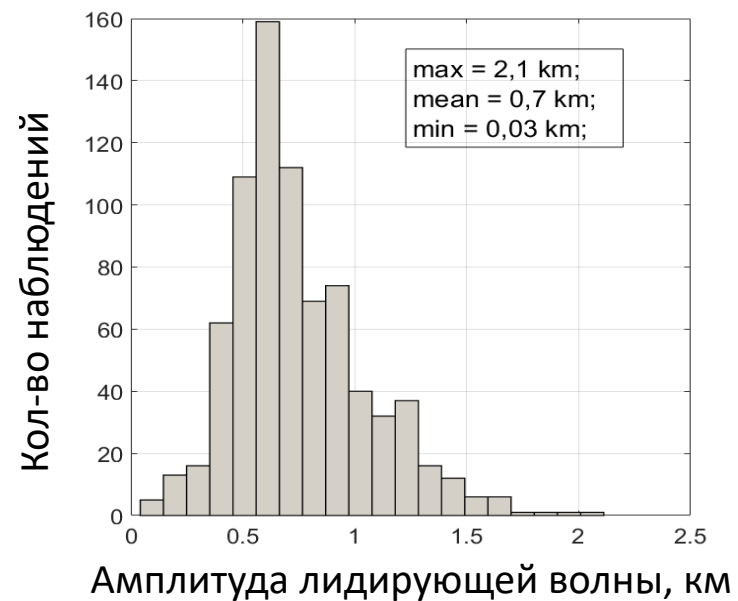
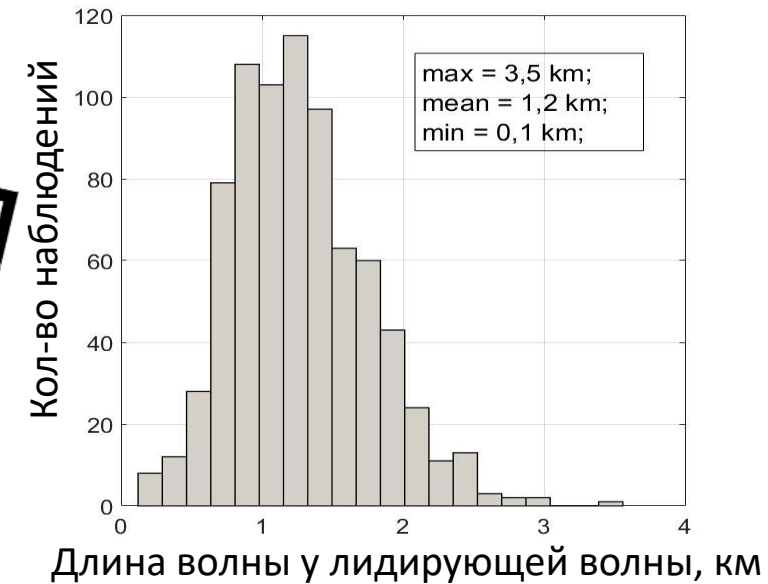
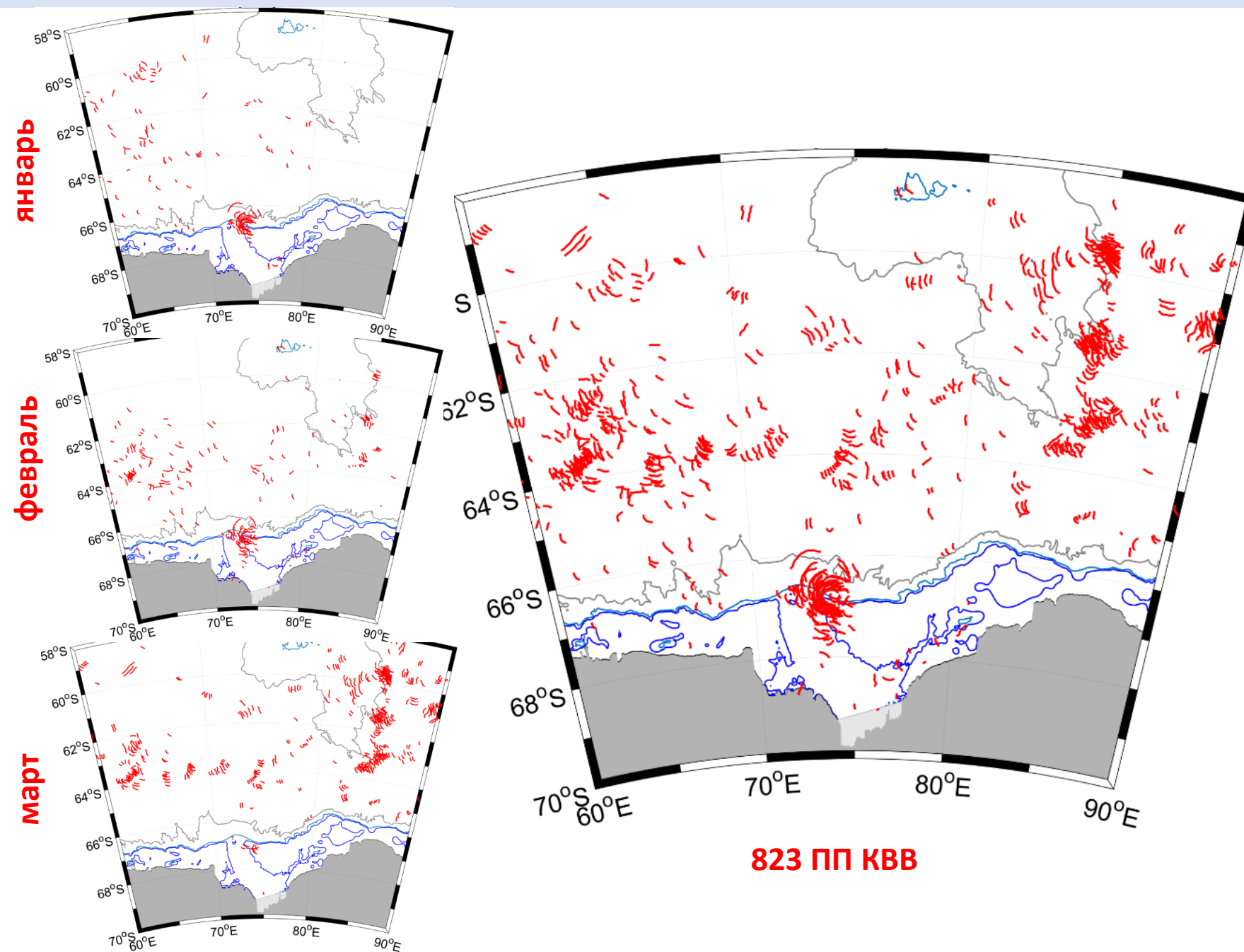
Программное обеспечение:

- *SNAP 8.0.0, MATLAB & Simulink.*

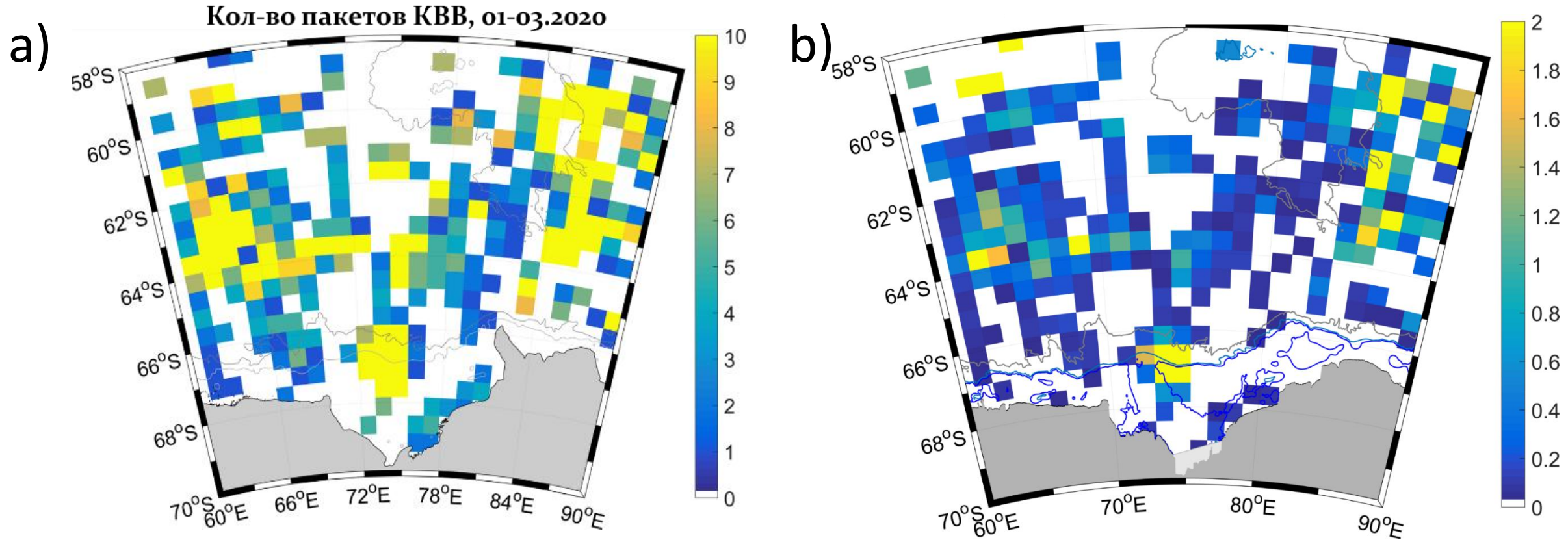


Карта покрытия акватории моря
Содружества РСА-данными

Результаты спутниковых наблюдений КВВ

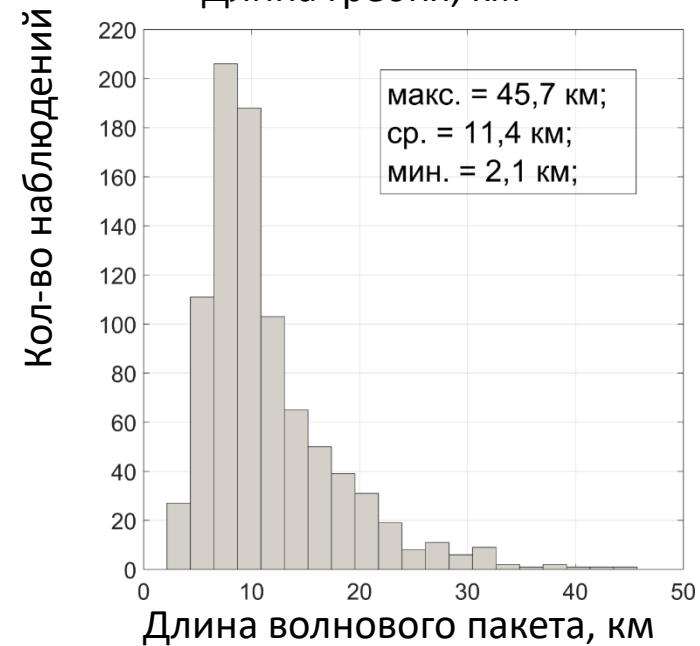
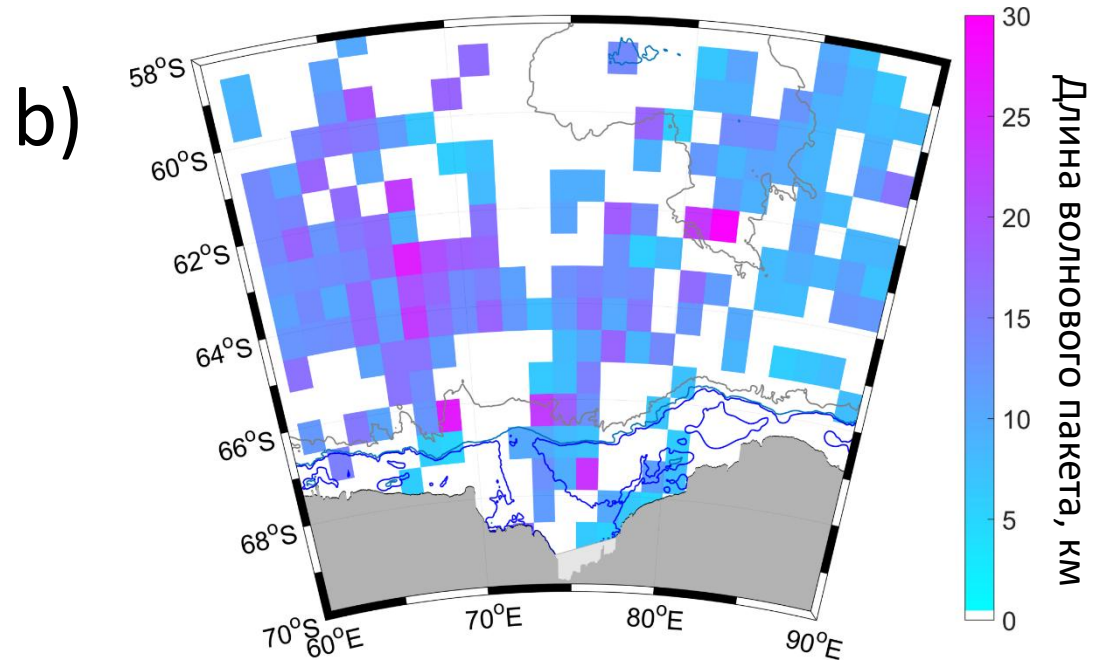
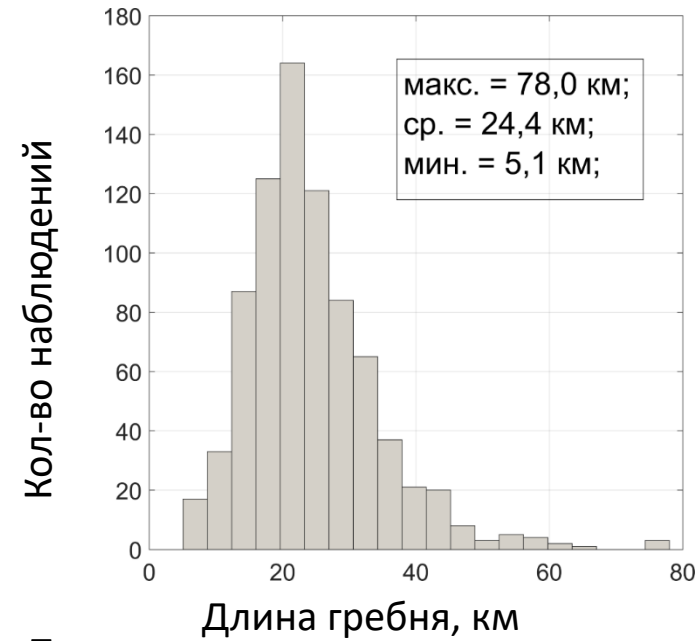
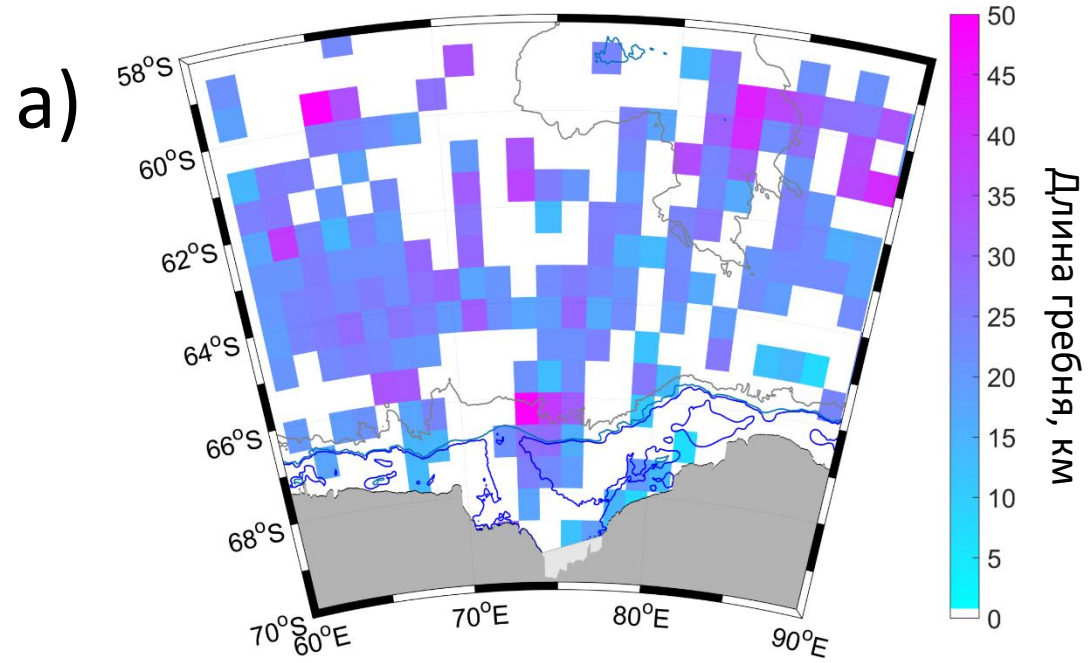


Результаты спутниковых наблюдений КВВ: районы и повторяемость

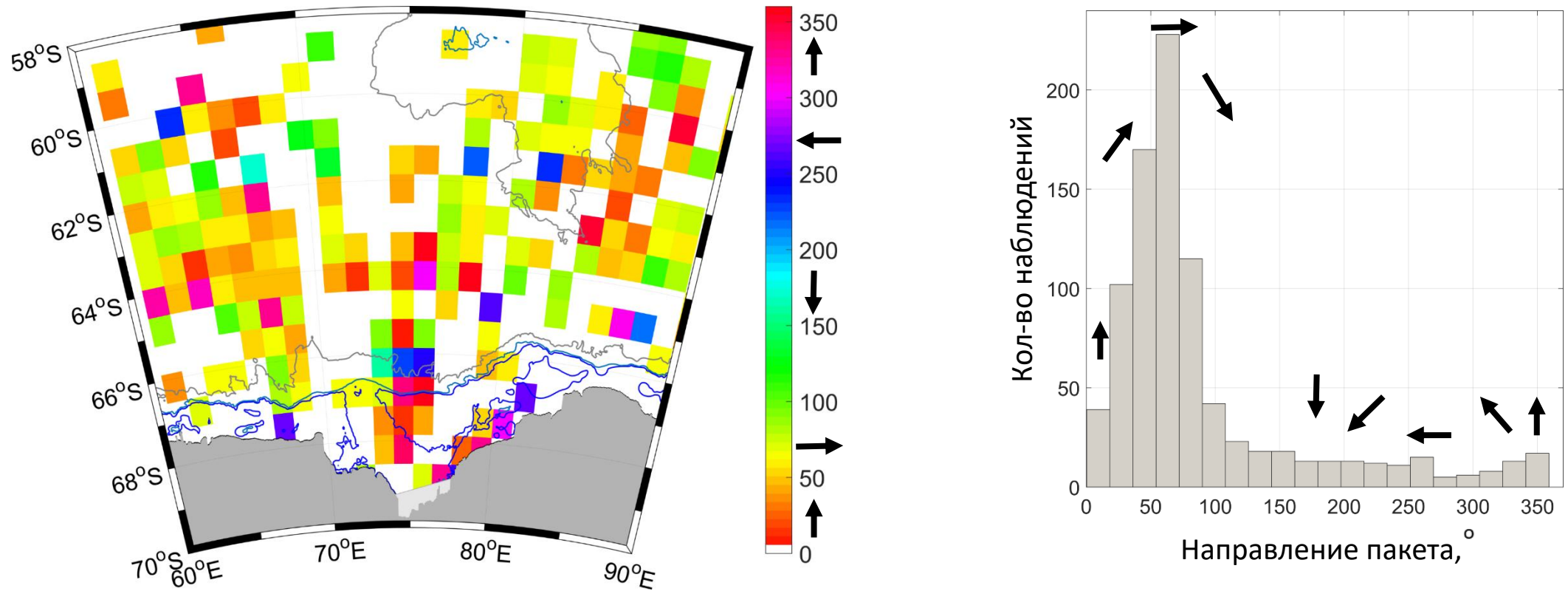


- Ключевые районы наблюдения КВВ, определяемые их максимальной повторяемостью, зарегистрированы в заливе Прюдс, над континентальным склоном, а также в глубоководной восточной и западной частях акватории.
- Пакеты КВВ имели высокую повторяемость (более 2 ПП КВВ/РЛИ) над континентальным склоном в северной части залива Прюдс, восточной и западной частях глубоководной части акватории.

Результаты спутниковых наблюдений КВВ: длина волнового фронта и длина волнового пакета



Результаты спутниковых наблюдений КВВ: направление распространения



Направление распространения пакетов КВВ было разнообразным с доминированием пакетов северо-восточного направления.

Механизмы генерации КВВ

- Основные механизмы генерации КВВ:
 - Эволюция внутренних приливных волн
 - Генерация баротропным приливом на неоднородным дном
 - Запрепятственная генерация (lee waves)
 - Резонансная генерация в транскритическом режиме
 - Генерация приливными лучами
 - Генерация волн на плюме
 - Генерация волн вихрями

Механизмы генерации КВВ

Основные механизмы генерации КВВ:

- Генерация баротропным приливом на бровке шельфа/континентальном склоне

Generation of ISWs over the continental slope by a barotropic tide through a baroclinic stage is effectively described by internal tidal body force (TBF) (Baines, 1982).

The depth-integrated TBF can be calculated as (e.g., Min et al., 2024):

$$F = -\frac{(\mathbf{Q} \cdot \nabla H)}{\omega H^2} \int_{-H}^0 z N^2(z) dz, \quad (1)$$

where $\mathbf{Q} = \mathbf{U} \cdot H$ is the barotropic mass flux vector, \mathbf{U} – tidal velocity vector, H is the total depth, ω is frequency of semidiurnal lunar tide M_2 ($T = 12.42$ h), $N^2(z) = (g/\rho \cdot d\rho/dz)$ is the squared buoyancy frequency.

To calculate TBF, we use bathymetry information from IBCSO V2 and tidal currents from TPXO9-atlas-v5 tidal model accounting for eight major tidal components (Howard & Padman, 2021; Greene et al., 2024), while N^2 is calculated using monthly reanalysis data from WOA23 at $1/12^\circ$ resolution.

Механизмы генерации КВВ

Основные механизмы генерации КВВ:

- Запрепятственная генерация (lee waves)
- Резонансная генерация в транскритическом режиме

Internal Froude number, Fr , characterizing the hydraulic state of a stratified shear flow over inhomogeneous bottom:

$$Fr = \frac{|\langle U \rangle_z|}{c_0}, \quad (2)$$

where $|\langle U \rangle_z|$ is the depth-averaged fluid velocity, and c_0 is the linear phase speed of the first mode internal waves. The latter is obtained by numerically solving the Sturm-Liouville equation for continuous density profile $\rho(z)$ (Gill, 1982; Ostrovsky & Stepanyants, 1989).

Tidal currents are obtained from TPXO9-atlas-v5 tidal model, while c_0 is calculated from the monthly WOA23 reanalysis data.

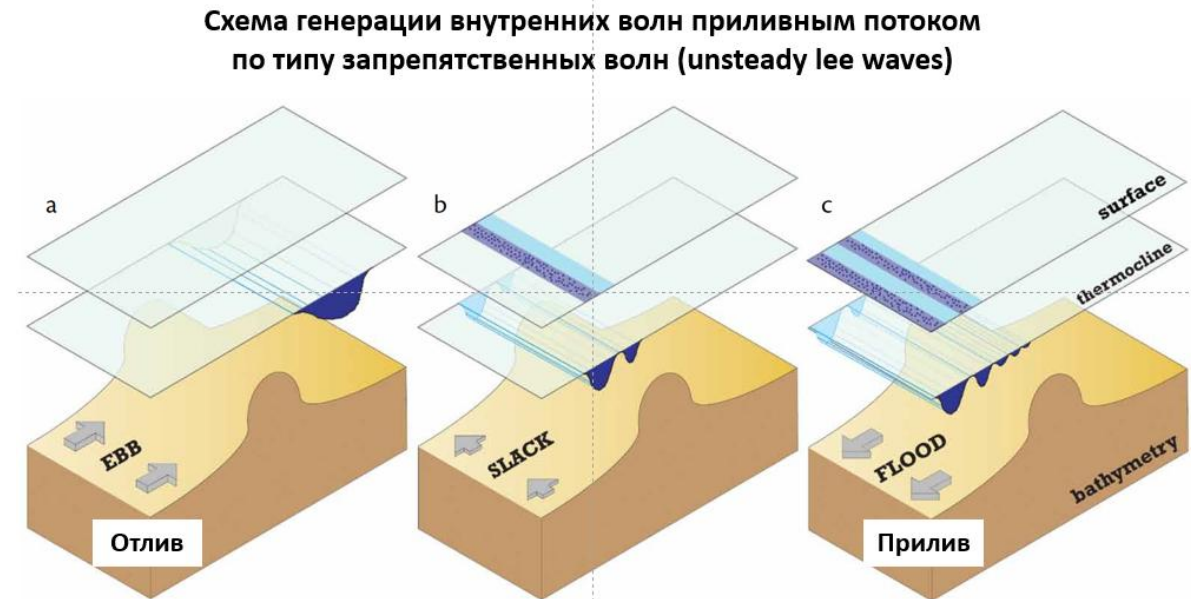
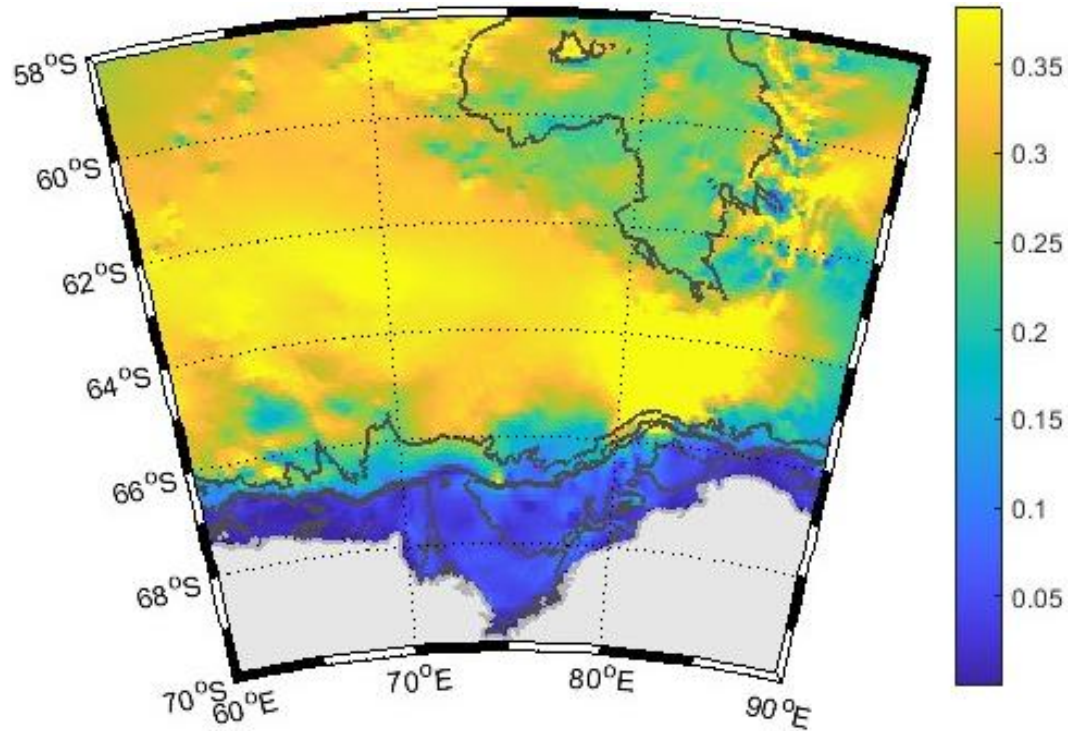


Figure 2. A schematic showing nonlinear internal wave generation via the lee wave mechanism of Maxworthy (1979). (a) As the stratified flow moves over the sill, the initial lee wave develops on the downstream side. (b) As the flow slackens, the lee wave steepens nonlinearly and propagates upstream over the sill. (c) The lee wave evolves into a nonlinear internal wave packet in a manner consistent with the predictions of Korteweg-de Vries theory. Adapted from Haury et al. (1979)

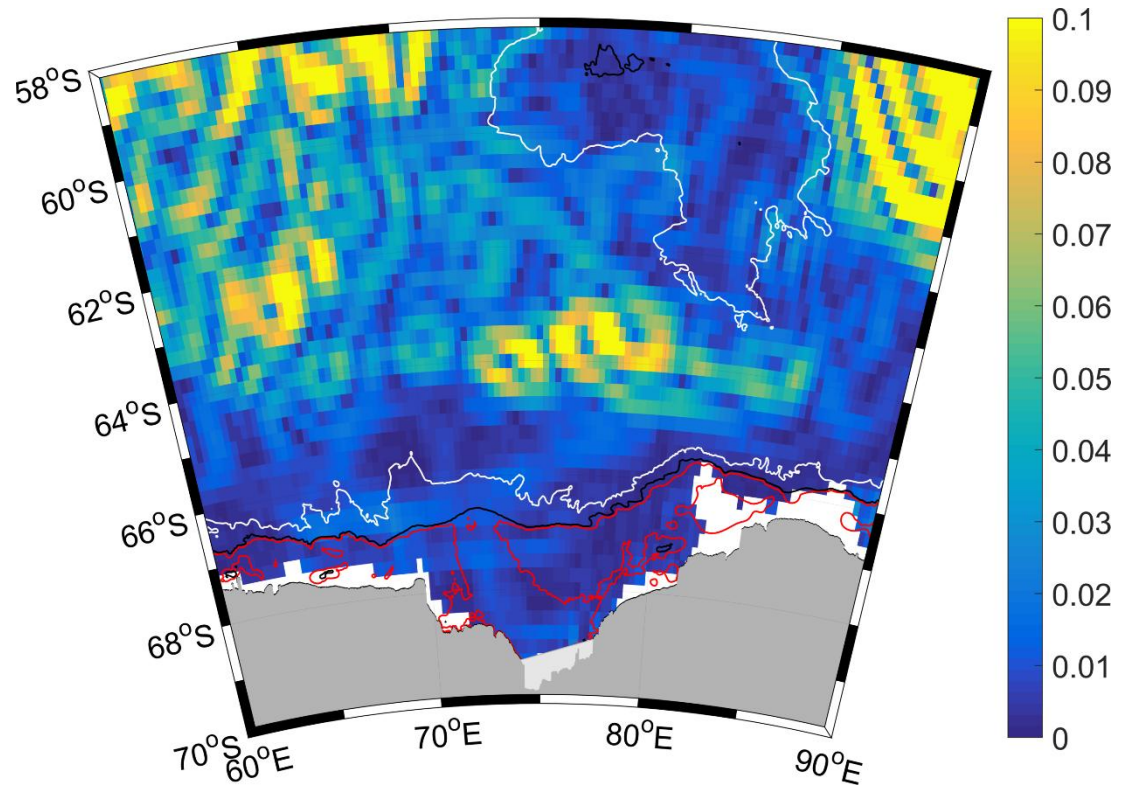
Механизмы генерации КВВ

Мы рассматриваем основные условия воздействия на исследуемый участок в январе – марте 2020г

a)



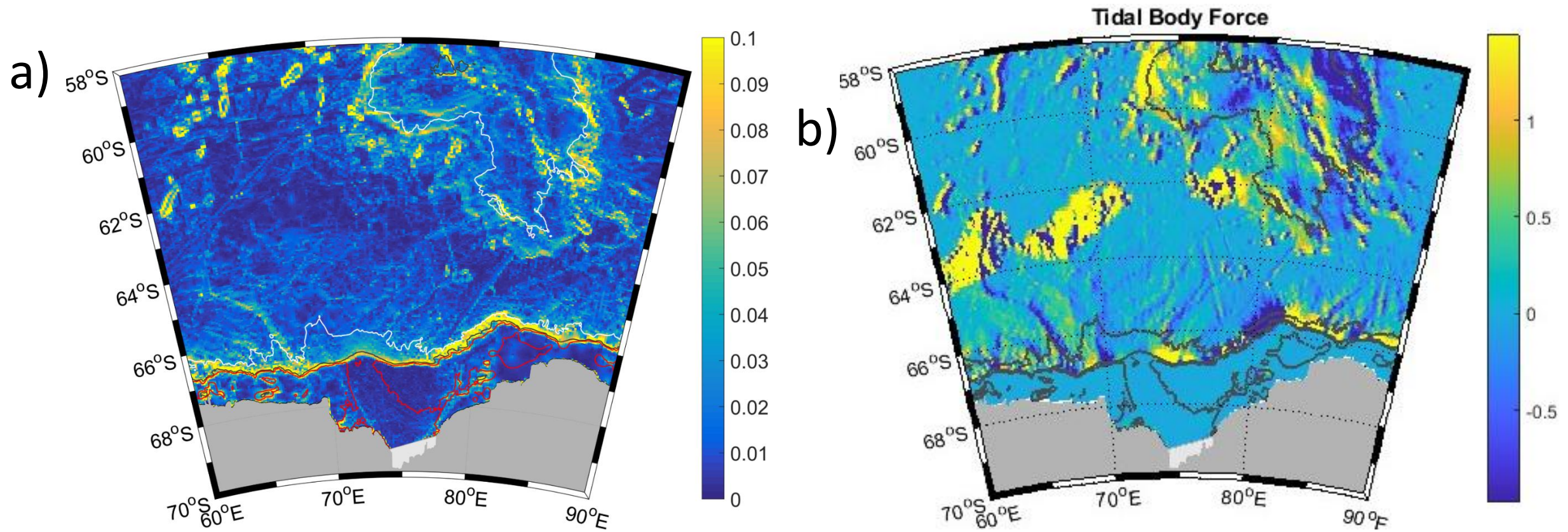
b)



a) Максимальные скорости течений из TRXO9-atlas-v5, м/с

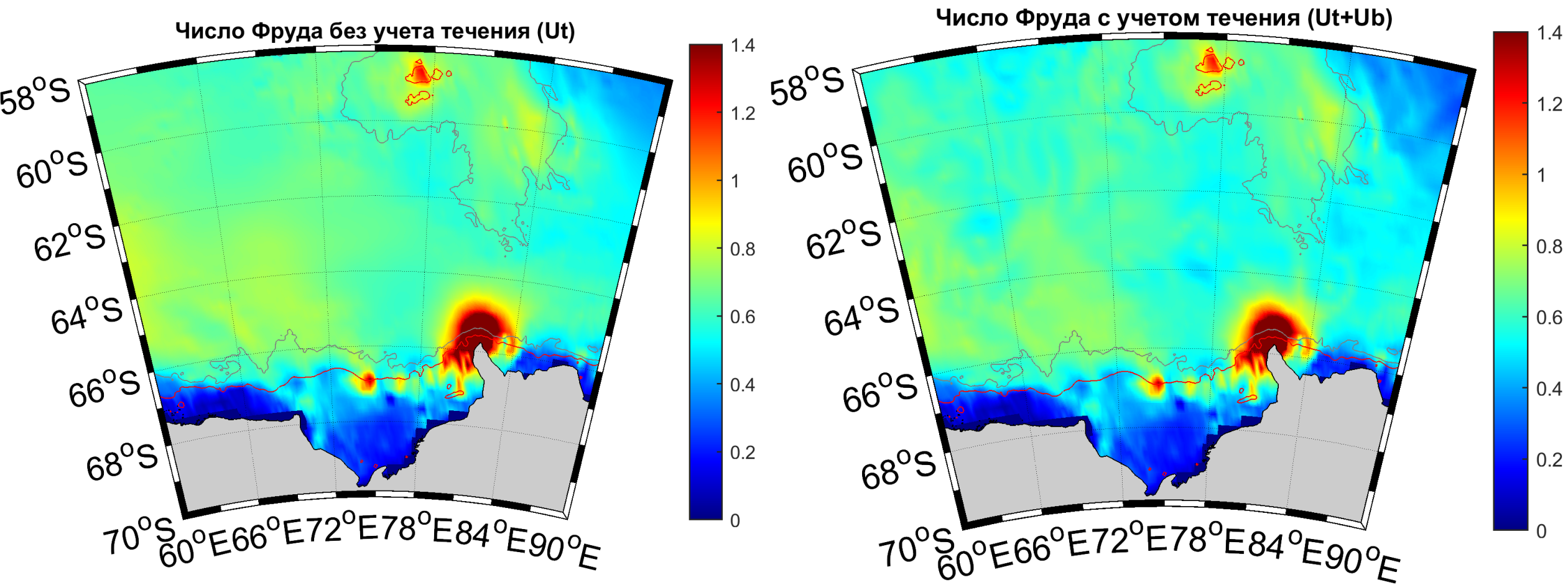
b) Аномалии фоновых геострофических течений из AVISO+ , м/с

Механизмы генерации КВВ



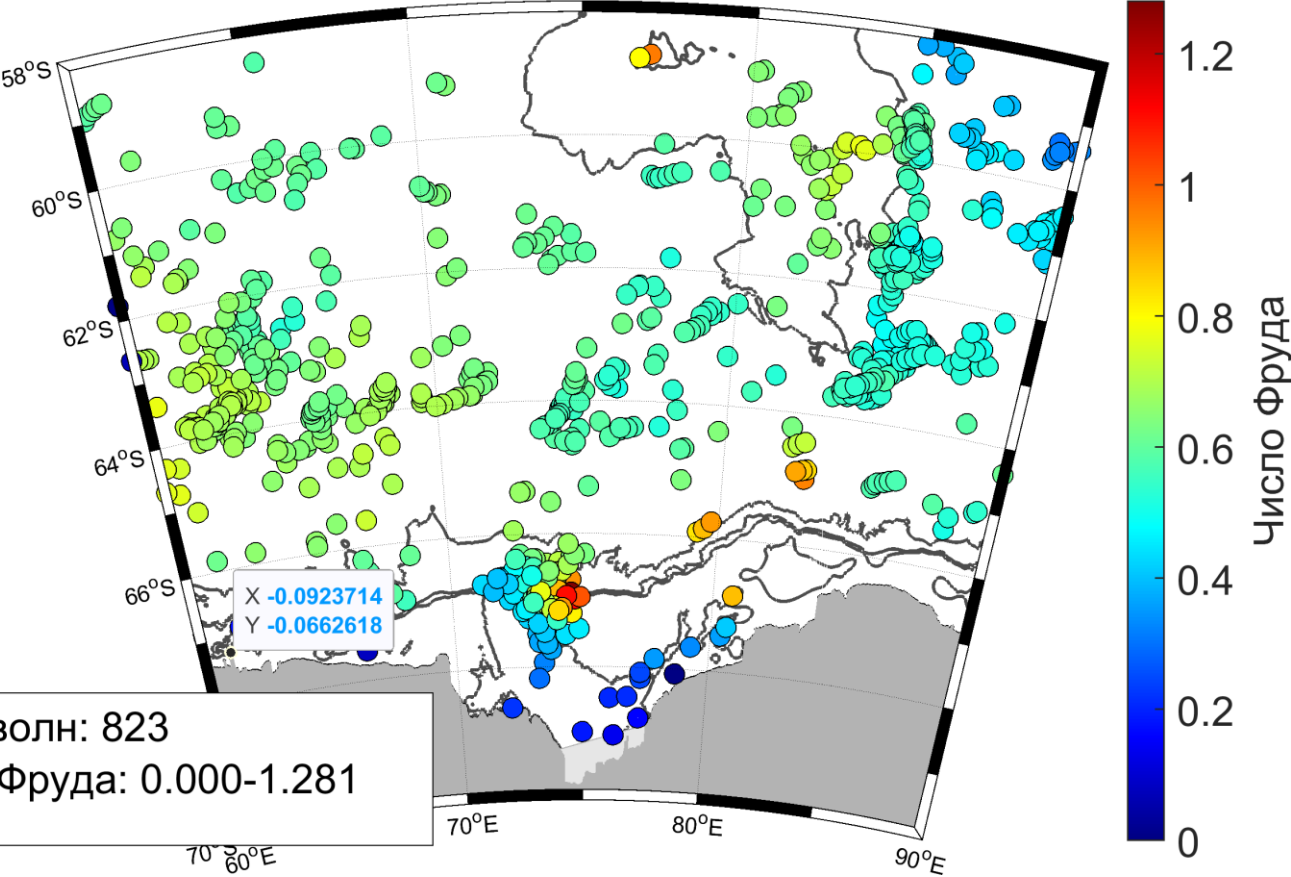
a) безразмерный уклон морского дна
b) tidal body force

Механизмы генерации КВВ



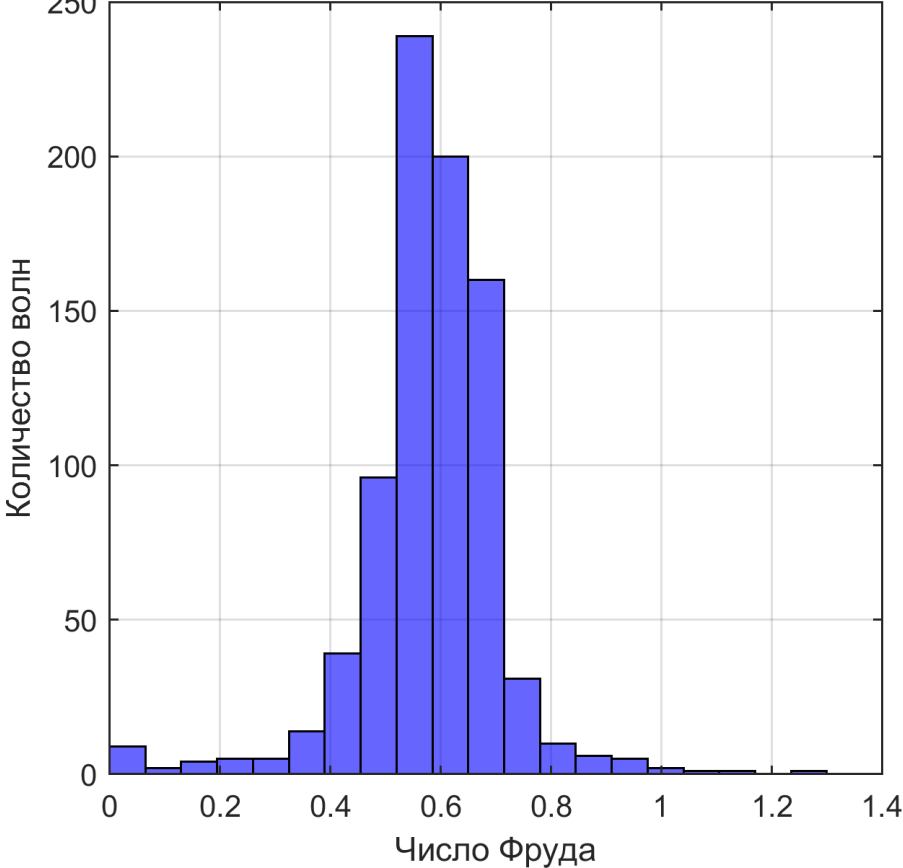
Механизмы генерации КВВ

Центры внутренних волн (проекция Ламберта)



Всего волн: 823
Число Фруда: 0.000-1.281

Распределение чисел Фруда



Механизмы генерации КВВ

Основные механизмы генерации КВВ:

- Генерация приливными лучами

Tidal beams are excited from the critical slopes of the continental shelf edge and impinge upon the pycnocline far away from the shelf causing so called “local generation” of ISWs.

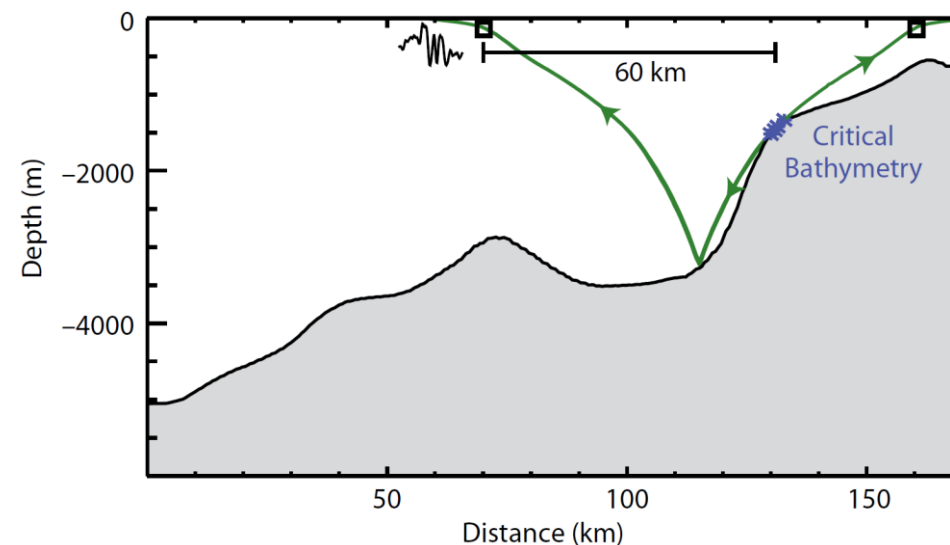
An effectiveness of local generation of ISWs is described by parameter γ , which is the ratio of the phase speed of linear internal waves in a two-layer system to the phase speed of waves in the uniformly stratified lower layer (Gerkema, 2001):

$$\gamma = \sqrt{g'd}/N_c H, \quad (4)$$

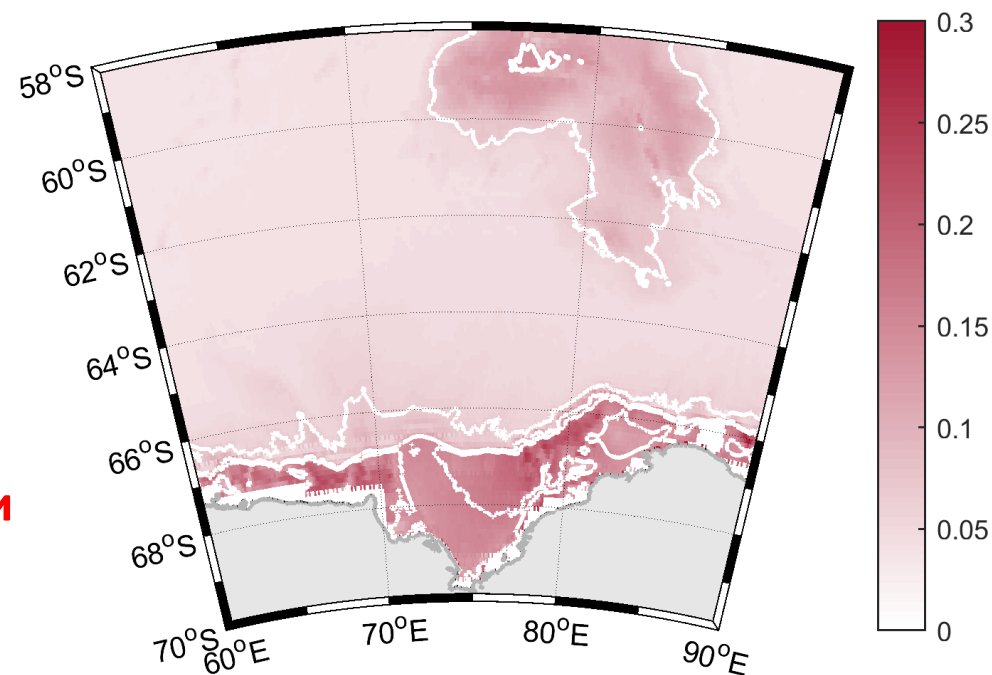
where d is thickness of the upper mixed layer, N_c is a constant buoyancy frequency in the lower layer below the pycnocline, H is the total water depth.

According to (Gerkema, 2001), the optimal excitation of ISWs in the pycnoclines occurs when $\gamma = 0.1$, while $\gamma = 0.2$ is the upper bound for the local generation of ISWs (Mercier et al., 2012).

Генерация КВВ возможна приливными лучами при $0.1 < \gamma < 0.2$



Jackson, C.R., J.C.B. da Silva, and G. Jeans. 2012. The generation of nonlinear internal waves. *Oceanography* 25(2):108–123, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>.



Заключение

- В данной работе впервые на основе анализа спутниковых РСА-данных Sentinel-1 А/В в период с января по март 2020 г. выполнен анализ характеристик поля КВВ в акватории моря Содружества, а также в глубоководной части антарктического бассейна к югу от Южного фронта АЦТ.
- Анализ 611 РЛИ позволил выделить 825 пакетов КВВ, определить основные районы их генерации и построить карты основных пространственных характеристик внутренних волн.
- Как правило, КВВ наблюдались в виде пакетов уединенных волн со средней длиной гребня лидирующей волны около 18-26 км и средней длиной пакета около 11 км (большинство значений находится в пределах 10–25 км. Направление распространения пакетов КВВ на акватории моря достаточно разнообразно, но преобладают северо-восточные направления пакетов.
- Наибольшее количество проявлений КВВ было сосредоточено на шельфе залива Прюдс (в среднем от 6 до 10 ПП КВВ), в глубоководной части акватории (в основном, севернее 64° ю. ш.), а также с подветренной стороны шельфового склона о. Херда и о. Макдональд (северо-восточная область выбранного района).
- Ключевые районы наблюдения внутренних волн, определяемые их максимальной повторяемостью, зарегистрированы над шельфовым склоном в северной части залива Прюдс, восточной и западной частях акватории.
- Механизмы генерации КВВ в этих районах различны. Согласно батиметрическим данным в северо-западной части акватории отсутствуют выраженные неоднородности рельефа, поэтому вполне вероятно, что многочисленные пакеты КВВ, наблюдаемые в глубоководных районах западной и центральной частей акватории, по-видимому, связаны с существенными неоднородностями в поле геострофических течений.
- Причиной генерации пакетов КВВ в шельфовых районах залива Прюдс и над континентальным склоном, вблизи поднятий дна у о. Херд и о. Макдональд, а также на юго-восточном склоне плато Кергелен является взаимодействие приливных течений с неровной топографией, а источником генерации КВВ, наблюдавшихся в непосредственной близости от шельфовых ледников (шельфовый ледник Эймери, Западный шельфовый ледник) может быть откалывание айсбергов или выход на поверхность турбулентных плюмов, образующихся при таянии ледника на его нижней границе
- В дальнейшем планируется анализ кинематических характеристик КВВ на основе использования последовательных РСА-измерений (см., например, Kozlov et al., 2020; Kozlov, Mikhailychenko, 2021), а также анализ вертикальной структуры наблюдаемых волн и механизмов их генерации на основе привлечения данных контактных измерений.



Спасибо за внимание!