XXIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ „СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА“, ИКИ РАН, МОСКВА, 9–13 НОЯБРЯ 2026 Г.

Параметры короткопериодных внутренних волн и условия их генерации в море Содружества по данным натурных и спутниковых наблюдений

Я. И. Бакуева[1], И. Е. Козлов[1], М. С. Молчанов[2], С. В. Кашин[2]

[1] Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

[2] Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

АКТУАЛЬНОСТЬ

Короткопериодные внутренние волны в море Содружества: степень изученности

Состояние вопроса

- КВВ — нелинейные внутренние волны с амплитудами 10–100 м, длинами 0.1–1 км и периодами 1–10 мин, распространяющиеся в виде цугов уединенных волн
- Основной механизм генерации — взаимодействие баротропного прилива с неоднородностями рельефа дна
- Обусловленное КВВ вертикальное перемешивание связано с формированием Антарктической донной воды
- По данным РСА Sentinel-1 (январь–март 2020 г.) материковый склон в северной части канала Прюдс выделен как район устойчивой генерации КВВ

Нерешенные вопросы

- Интерпретация поверхностных проявлений КВВ на РСА-изображениях затруднена в отсутствие данных о вертикальной структуре вод
- Влияние межгодовой изменчивости глубины и резкости пикноклина на пространственное распределение и параметры КВВ на антарктическом шельфе не исследовано
- Фазовая скорость первой бароклинной моды и коэффициенты уравнения KdV для района ранее не рассчитывались

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Сопоставить поле КВВ на снимках Sentinel-1 со стратификацией вод в январе 2016 и 2025 гг.

1 Выделить поверхностные проявления КВВ на снимках Sentinel-1 и измерить длину фронта лидирующей волны и ширину пакета

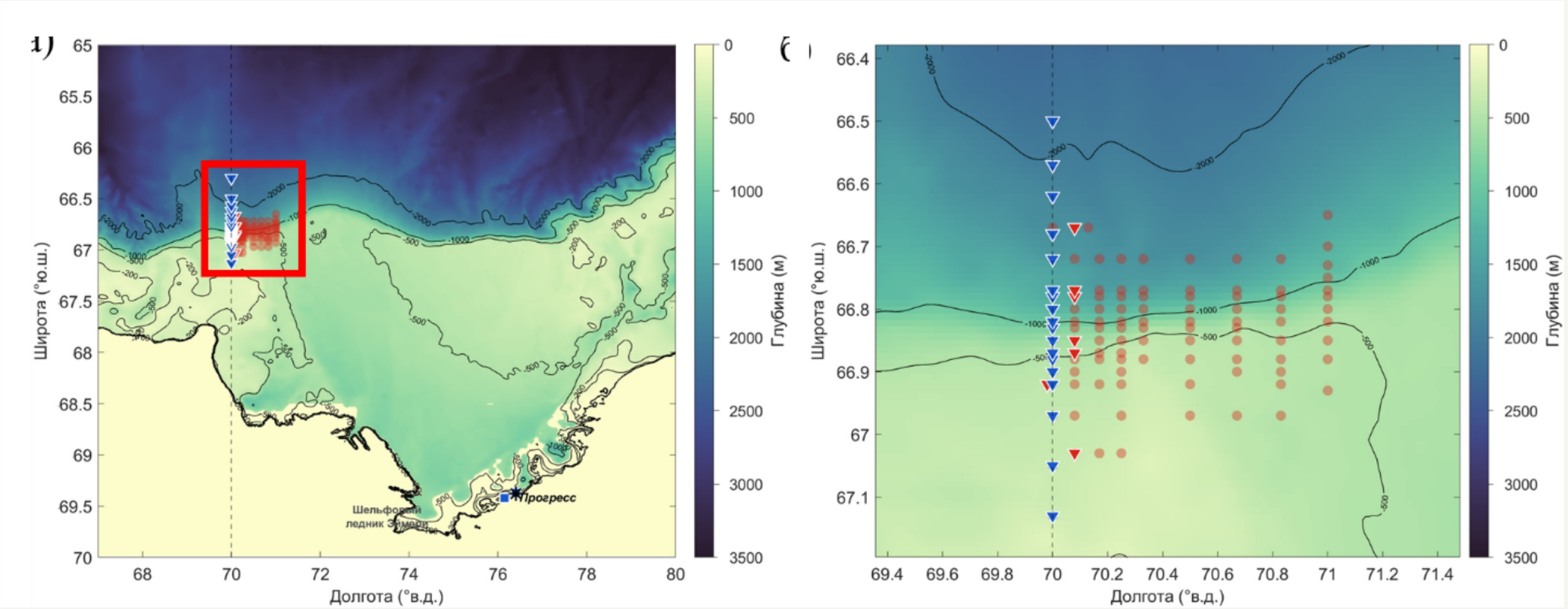
2 По данным CTD на разрезе 70° в.д. рассчитать частоту плавучести, толщину ВПС, глубину и толщину пикноклина

3 Рассчитать фазовую скорость первой бароклинной моды и коэффициенты нелинейности α и дисперсии β уравнения KdV

4 Сравнить межгодовые различия стратификации с различиями в распределении и масштабах пакетов КВВ

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Залив Прюдс и разрез вдоль 70° в.д.



● станции 2016 г. · ▼ станции 2025 г. · пунктир — разрез 70° в.д.; батиметрия IBCSO v.2

ДАННЫЕ

Снимки Sentinel-1 и CTD-зондирования двух экспедиций

Sentinel-1A/B, L1 GRD

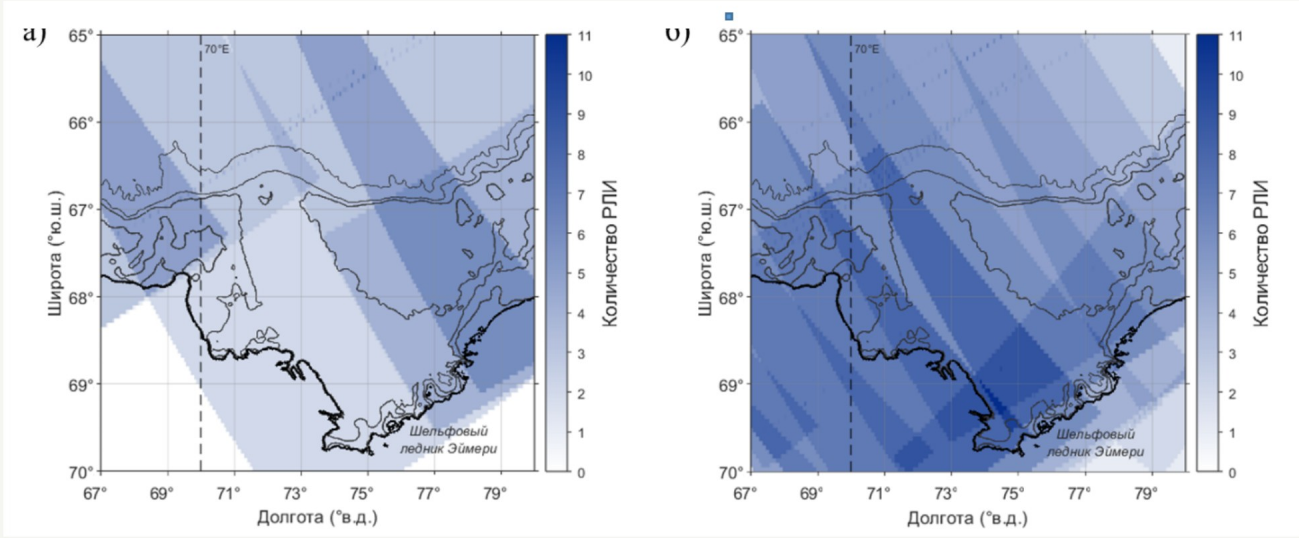
Режимы EW (93×87 м) и IW (20×20 м), архив ASF

январь 2016 г. — 19 снимков
январь 2025 г. — 40 снимков

CTD, формат WOD

2016 г., НЭС «Академик Федоров»: 106 станций, 22 на разрезе
2025 г., 70-я РАЭ: 24 станции, 14 на разрезе

Глубины на разрезе 300–2200 м



Число снимков в каждой точке: а — 2016 г., до 6–7; б — 2025 г., до 10–11

МЕТОДИКА

Что измеряли на снимках и что рассчитывали по CTD

Снимки (SNAP, Matlab)

- Положение фронта лидирующей волны каждого пакета
- Длина фронта лидирующей волны
- Ширина пакета — по сечению поперек фронтов
- Число проявлений на снимок

CTD, разрез 70° в.д.

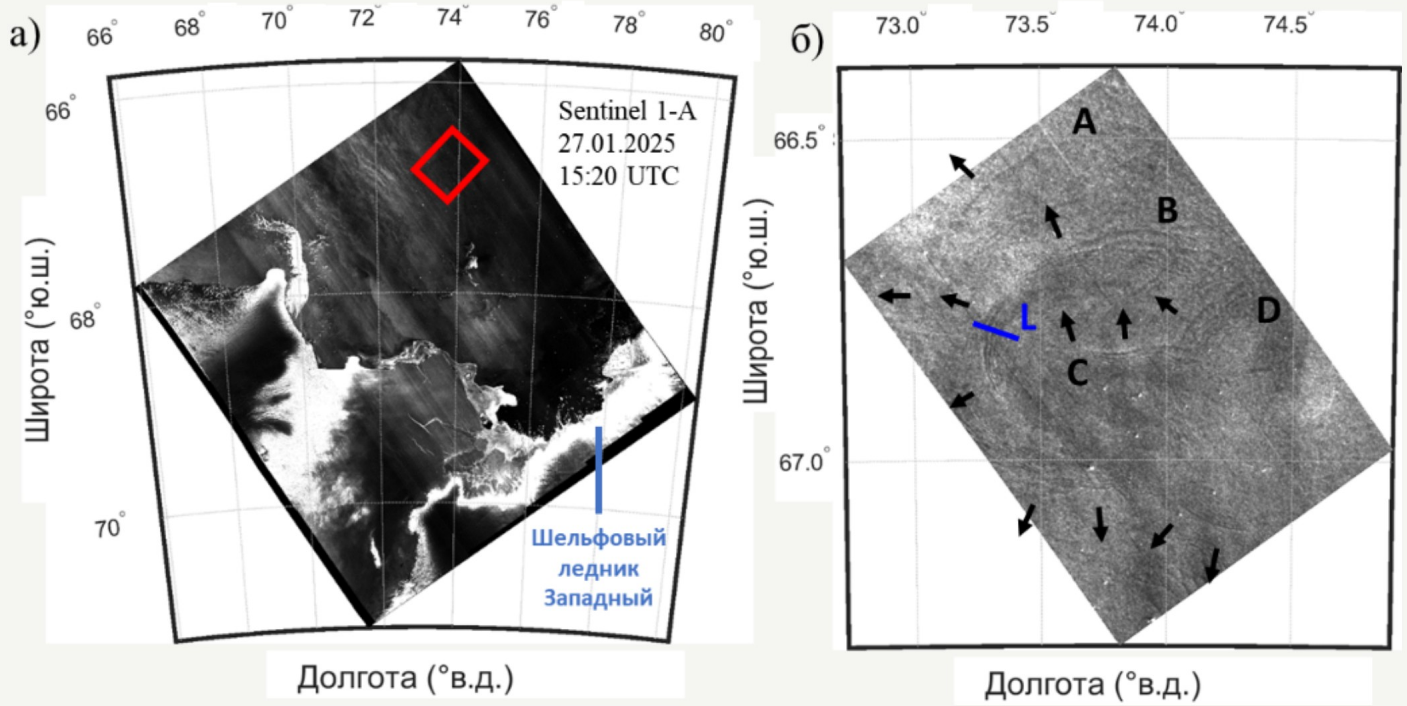
σt по EOS-80; $N^2(z) = (g/\rho_0)\cdot\partial\rho/\partial z$, сглаживание 5 м

ВПС — по снижению T на 0.2 °C; пикноклин — максимум N^2, толщина — ширина пика на 50 %

Первая мода: $\varphi'' + (N^2/c_0^2)\cdot\varphi = 0$, $\varphi(0) = \varphi(H) = 0$

$\alpha = (3c_0/2)\cdot\int\varphi'^3 dz / \int\varphi'^2 dz$ $\beta = (c_0/2)\cdot\int\varphi^2 dz / \int\varphi'^2 dz$

Четыре пакета КВВ от одного источника



Sentinel-1A, 27.01.2025, 15:20 UTC

Пакеты A, B, C, D концентрической формы, движутся на северо-запад

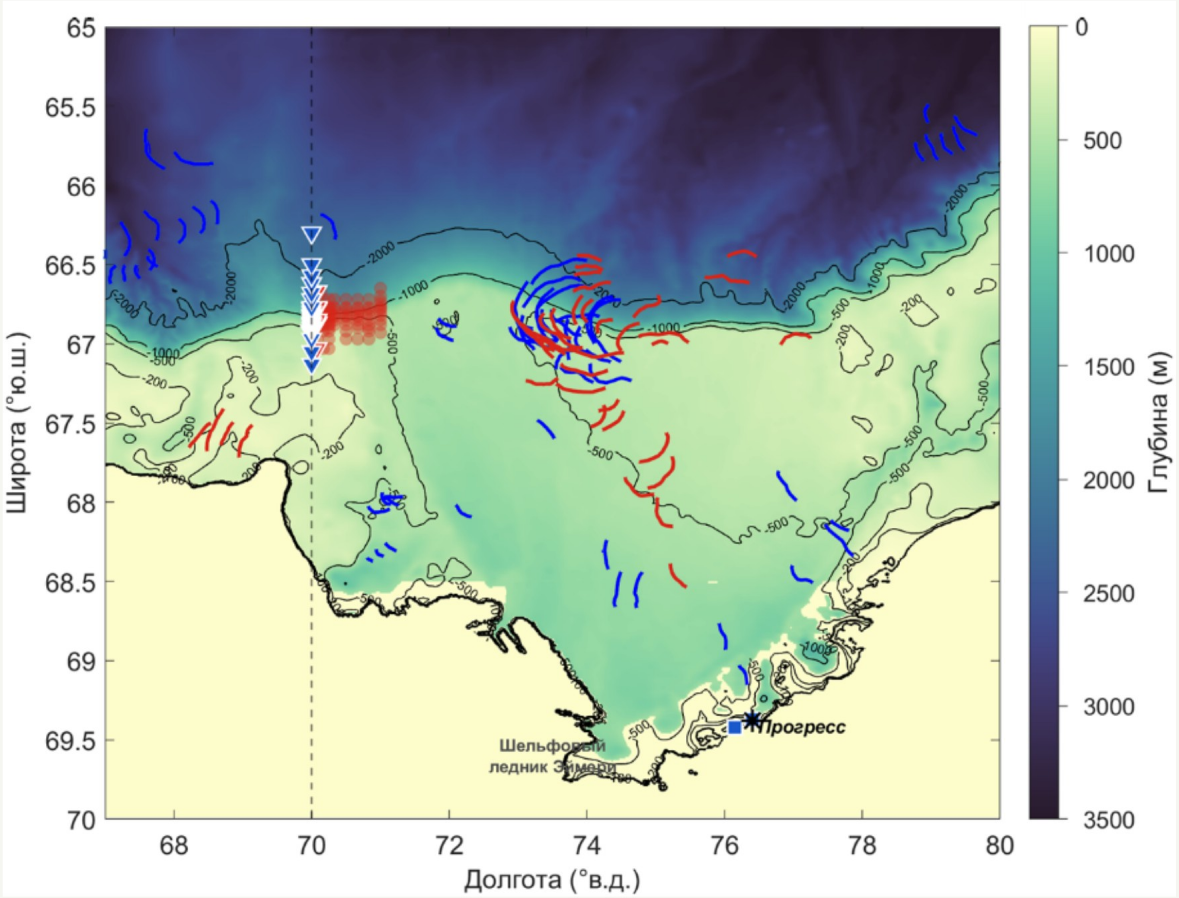
Расстояния между пакетами 2.4–3.2 км

Пакет B: 5–6 солитонов, фронт ~32 км, длина волны 500–700 м

Пакет A: фронт ~50 км

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В 2016 г. проявлений КВВ на один снимок было больше



3.6

на снимок в 2016 г.
69 проявлений, 19 снимков

2.4

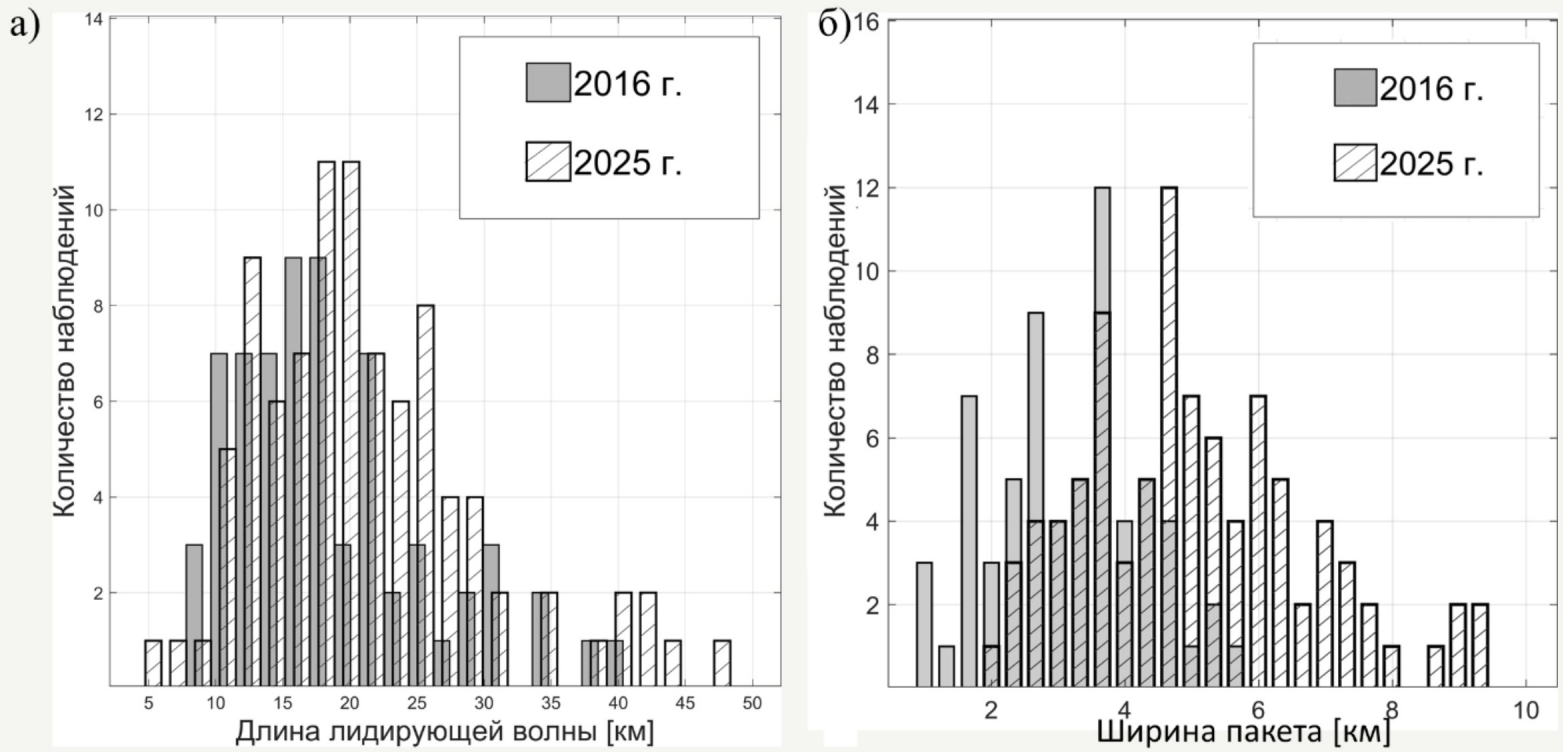
на снимок в 2025 г.
95 проявлений, 40 снимков

2016 г.: западный склон (68–70° в.д., глубины 200–500 м) и центр залива (73–76° в.д.)

2025 г.: проявления КВВ рассеяны по заливу, появились в глубоководной части севернее 66.5° ю.ш.

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В 2025 г. пакеты длиннее и шире



Длина фронта

2016 г.: чаще 12–18 км

2025 г.: чаще 15–23 км, больше фронтов 25–50 км

Ширина пакета

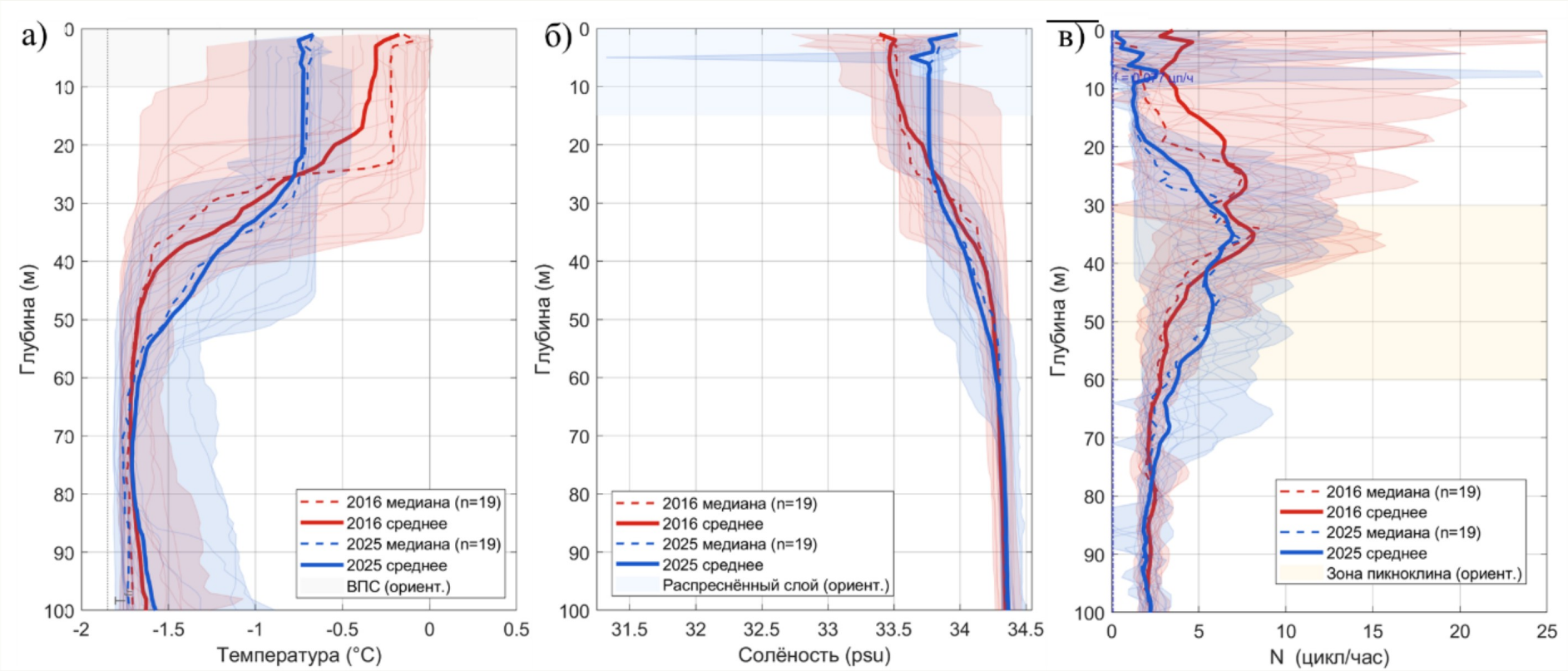
2016 г.: пик 2–3 км, более 80 % уже 5 км

2025 г.: больше пакетов шириной 4–6 км

а — длина фронта лидирующей волны; б — ширина пакета. Серые — 2016 г., штриховка — 2025 г.

НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ

В 2025 г. пикноклин глубже, а ВПС тоньше



2016 г.: ВПС 20 м, пикноклин на 25 м

2025 г.: ВПС 5 м, пикноклин на 37 м

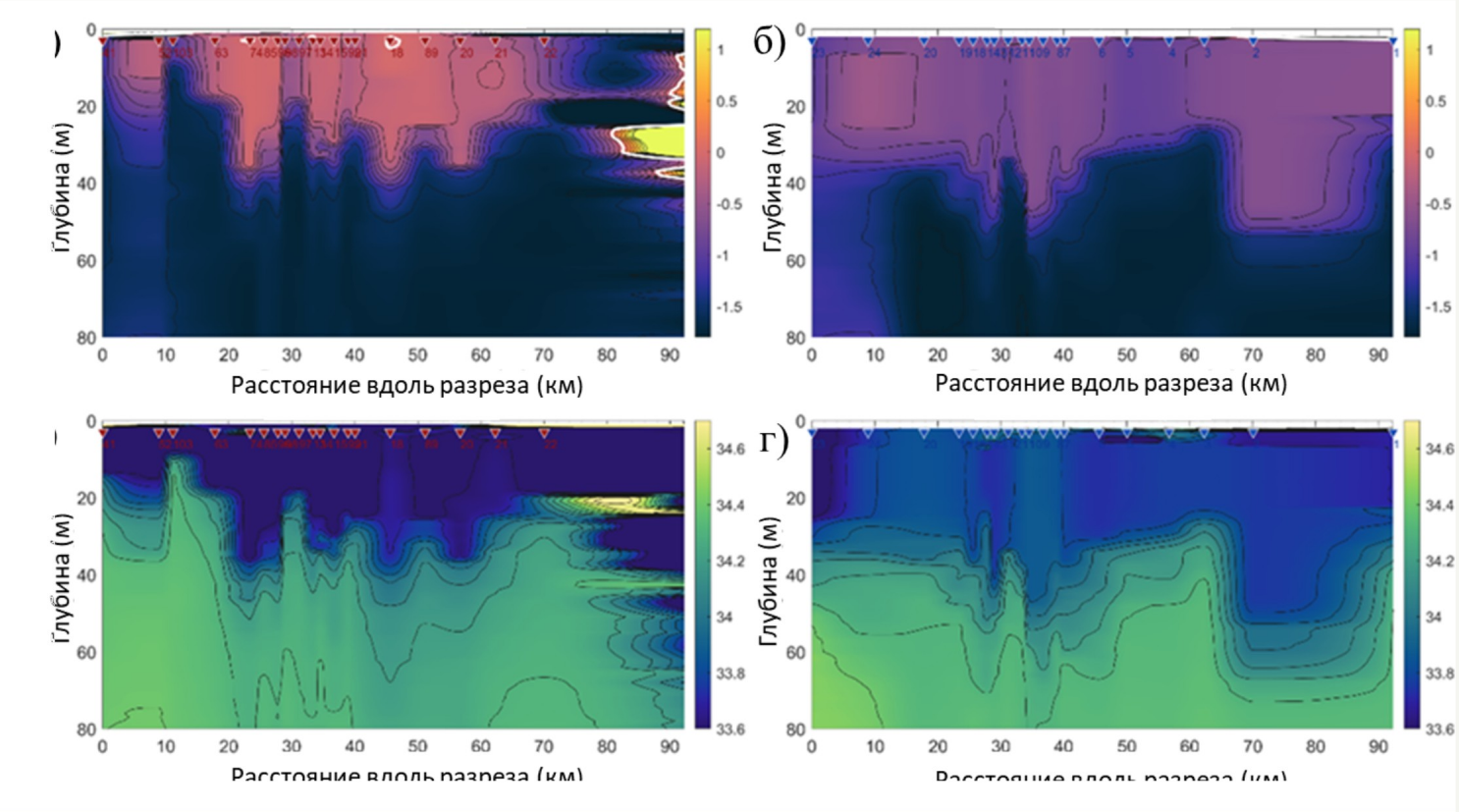
а — температура, б — соленость, в — частота плавучести

НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ

Разрез 70° в.д.: прогретый слой есть только в 2016 г.

2016 г.

2025 г.



Температура, °C

0…+1 в слое 0–15 м, термоклин 15–35 м

−0.5…0, термоклин 30–45 м, размыт

Соленость, ‰

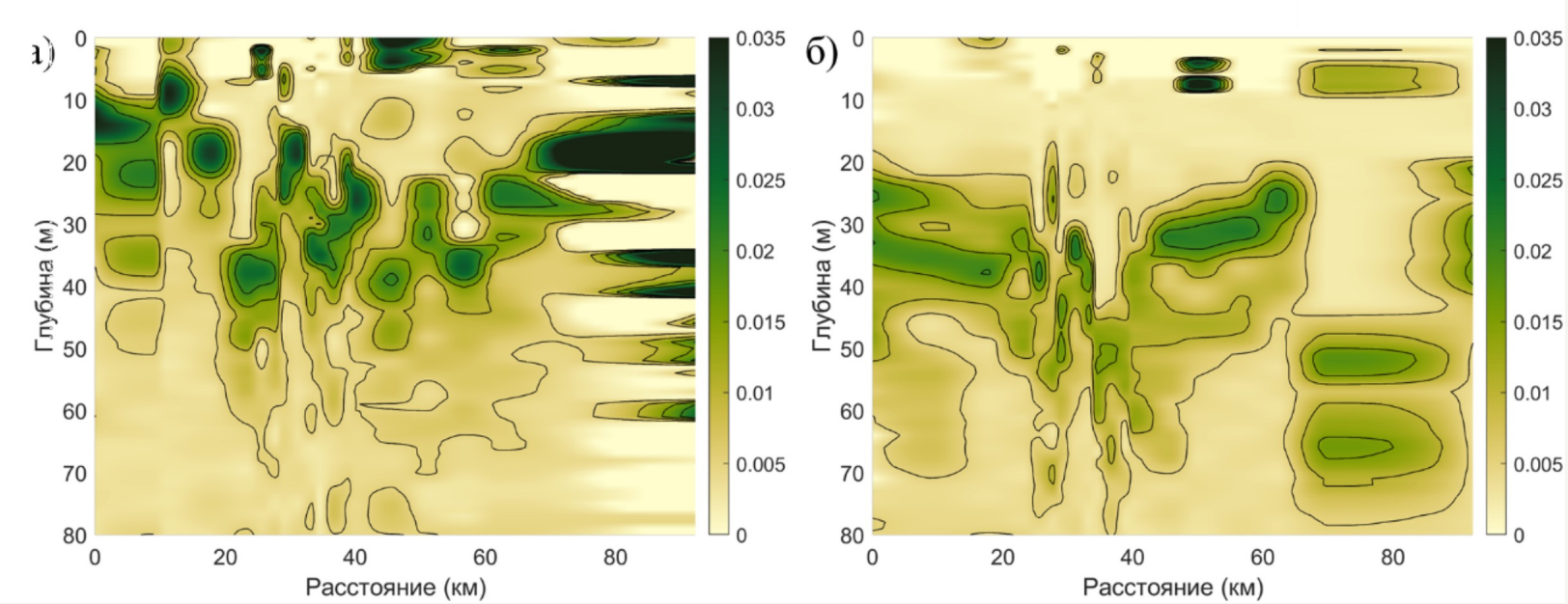
33.6–33.8 в слое 0–20 м, крутой галоклин

33.9–34.1, галоклин на ~35 м

НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ

Частота плавучести: резкий пикноклин в 2016 г., растянутый в 2025 г.

2016 г. **2025 г.**

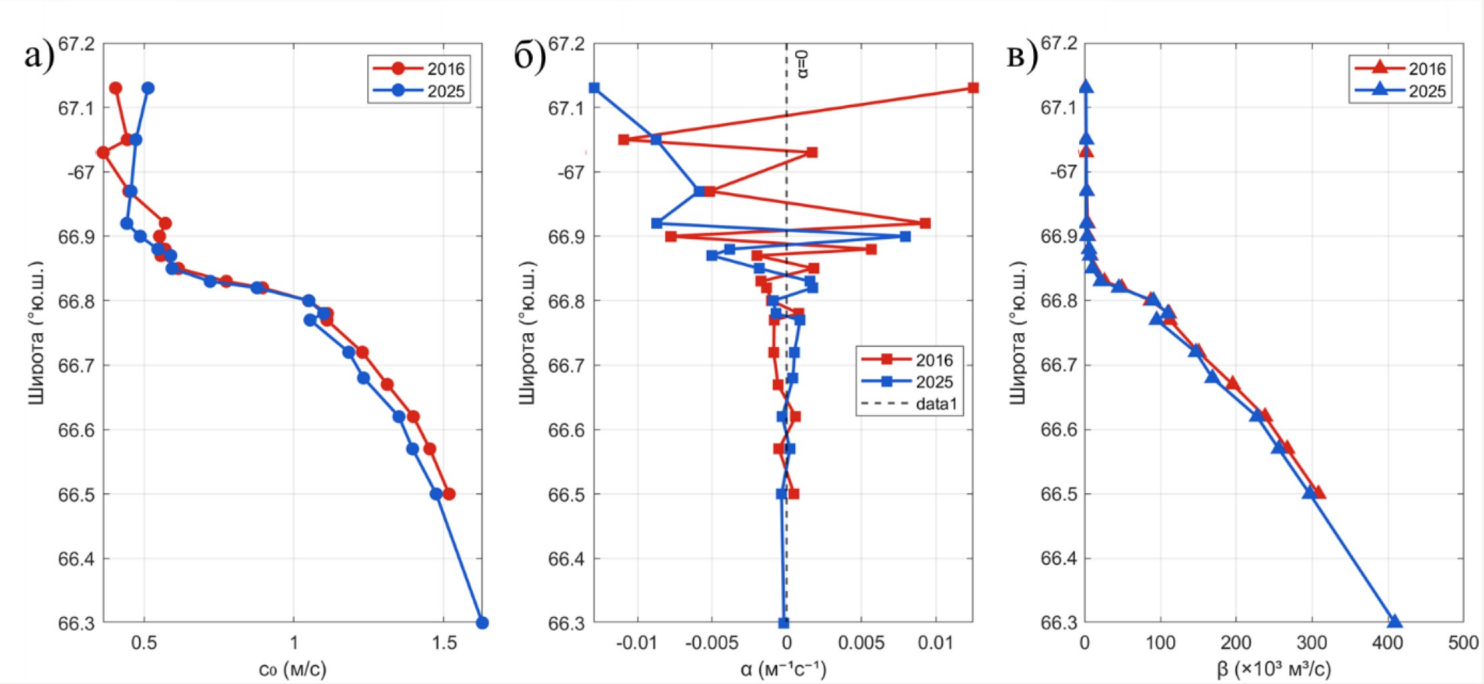


Максимум N в слое 10–40 м, до 0.025–0.035 рад/с; ядра на 15–20 и 25–40 м, толщина 10–20 м

Максимум N в слое 20–50 м, 0.015–0.025 рад/с; однороднее вдоль разреза, толщина 25–30 м

ПАРАМЕТРЫ KDV

Фазовая скорость почти не изменилась, нелинейность — да



а — c_0, м/с; б — α, $м^{-1}с^{-1}$; в — β, 10^3 $м^3/с$

co

0.8 ± 0.3 м/с и 0.9 ± 0.3 м/с; от 0.4 м/с на шельфе до 1.6 м/с над глубинами 2000 м

α

Меняет знак; |α| до 0.013 $м^{-1}с^{-1}$ на шельфе, меньше 0.001 над глубинами более 1500 м

|α|/β

В 2016 г. на 20–40 % выше: солитоны круче и уже

СОПОСТАВЛЕНИЕ

Более глубокий и размытый пикноклин 2025 г. — более длинные и широкие пакеты

Параметр	Январь 2016 г.	Январь 2025 г.
Толщина ВПС, средняя	20 м	5 м
Глубина пикноклина	25 м	37 м
Толщина слоя максимума N	10–20 м	25–30 м
Фазовая скорость c_0	0.8 ± 0.3 м/с	0.9 ± 0.3 м/с
$\lvert\alpha\rvert/\beta$	выше на 20–40 %	ниже
Проявлений КВВ на снимок	3.6	2.4
Длина фронта лидирующей волны, чаще всего	12–18 км	15–23 км
Ширина пакета, чаще всего	2–3 км	4–6 км

Вклад прилива, ветра, мезомасштабной циркуляции и ледовой обстановки в этой работе отдельно не оценивался

Выводы

1. Стратификация в январе 2016 и 2025 гг. различается: ВПС 20 и 5 м, пикноклин на 25 и 37 м; в 2025 г. пикноклин менее резкий

2. Фазовая скорость первой моды растет с глубиной от 0.4 до 1.6 м/с; межгодовое различие незначимо

3. Коэффициент α мал и меняет знак, $|\alpha|$ до 0.013 $м^{-1}с^{-1}$ на шельфе, немного преобладают волны понижения; $|\alpha|/\beta$ в 2016 г. на 20–40 % выше

4. Впервые для моря Содружества стратификация по данным двух экспедиций сопоставлена с полем КВВ на снимках Sentinel-1: изменения глубины и резкости пикноклина согласуются с различиями в локализации, плотности проявлений и масштабах пакетов

Дальше: роль прилива, ветра и мезомасштабной циркуляции — численное моделирование и синхронные натурные наблюдения

Спасибо за внимание

Я. И. Бакуева · yasya1egupova@gmail.com

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН МГИ РАН (темы FNNN-2024-0017, FNNN-2024-0012). Экспедиционные работы 2025 г. выполнены в рамках 70-й Российской антарктической экспедиции. CTD-данные получены в рамках темы 5.2 НИТР Росгидромета «Океанологические, климатологические, гляциологические и геофизические исследования в Антарктике и Южном океане» (2025–2029 гг.)