



## Валидация динамики уровня Балтийского моря: анализ Baltic Sea Physics Reanalysis по данным береговых мареографов

***Н. В. Боровец<sup>1</sup>, И. П. Медведев<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

<sup>2</sup> *Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН*

### **Введение**

Изучение колебаний уровня Балтийского моря является важным направлением в контексте изменений климата и их влияния на прибрежные территории. Реанализы, такие как Baltic Sea Physics Reanalysis, предоставляемые Copernicus Marine Service, позволяют получить подробные данные для анализа, но требуют дополнительной валидации с фактическими наблюдениями.

Основная цель данного исследования — провести валидацию данных уровня моря из Baltic Sea Physics Reanalysis с использованием наблюдений с береговых мареографов, расположенных на юго-восточном побережье Балтийского моря и в Финском заливе. В качестве эталона были взяты данные более 50 мареографов по всему побережью от Оулу до Иккермюнде. На основе этого анализа была получена оценка, насколько данные реанализа адекватно воспроизводят фактические изменения уровня Балтийского моря.

Результаты валидации показали, что реанализ в целом корректно отображает долгосрочные колебания уровня моря. Однако были выявлены отклонения, которые проявляются на разных временных масштабах, а также сезонные колебания в точности, что требует дополнительного внимания при использовании реанализов в подобных исследованиях.

### **Данные и методы**

Для исследования пространственно-временной изменчивости уровня моря были использованы данные реанализа, подготовленные Copernicus Marine Service. Реанализ содержит модельные расчёты физического состояния Балтийского моря, включая среднесуточные значения параметров, таких как высота уровня моря над средним уровнем моря (SSH), концентрация и толщина морского льда, температура, солёность и горизонтальные скорости течений на 56 вертикальных уровнях. Также включены данные по температуре и солёности в нижних слоях и глубине перемешиваемого слоя.

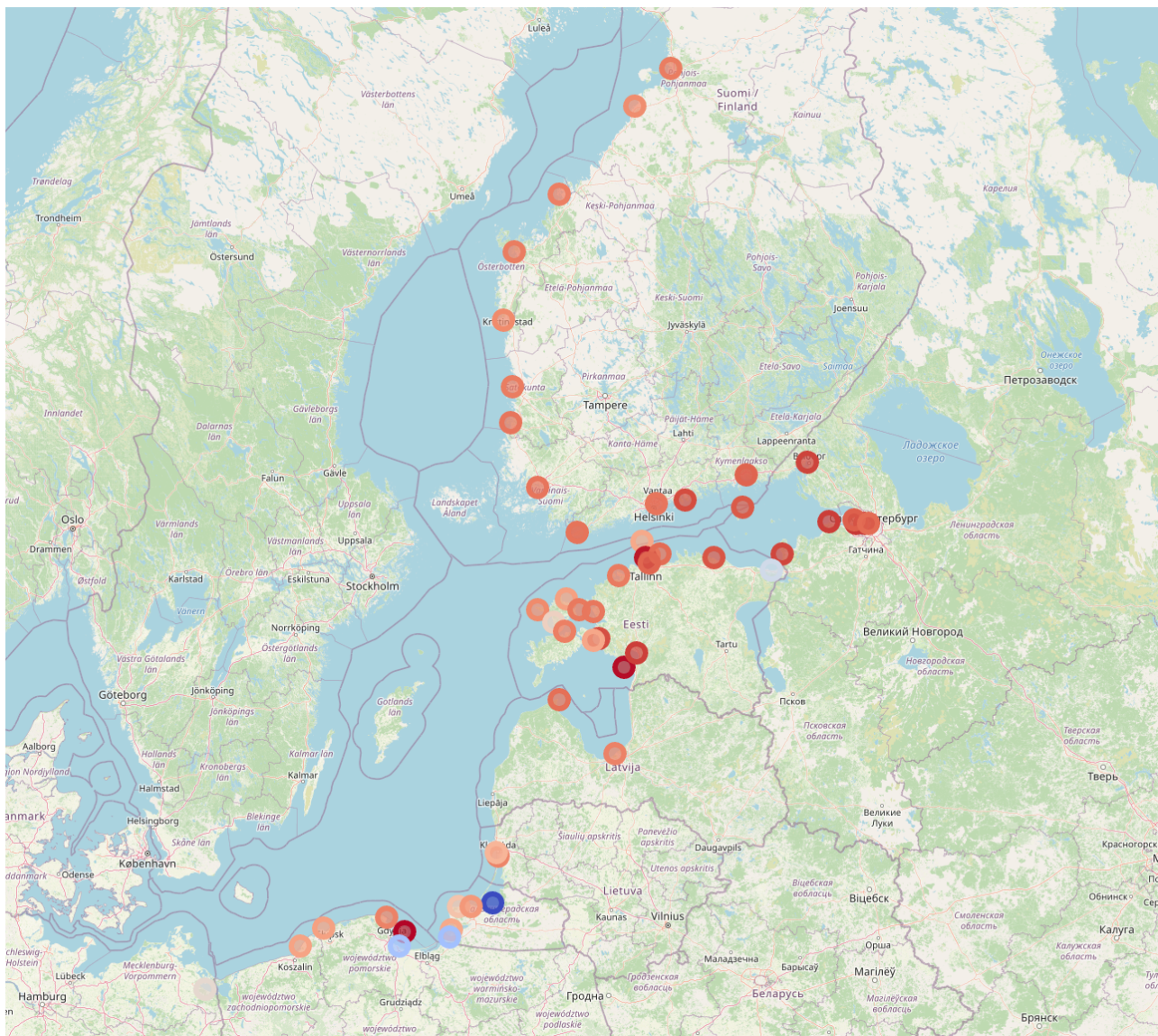


Рис. 1. Область исследования и расположение ~50 метеорографов, данные которых использовались для валидации. Цвет точек (coolwarm) отражает коэффициент корреляции (интерактивная карта с графиками в каждой точке – <https://map.nikborovets.ru/>).

Реанализ был выполнен с использованием трёхмерной океанско-ледовой модели NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean), версии 4.0, адаптированной специально для Балтийского моря в рамках системы BAL MFC. Модель включает термодинамику морского льда (SI3).

Наблюдаемые данные для валидации были собраны из баз данных Института океанологии имени П. П. Ширшова РАН и Copernicus Marine Service. Эти данные представлены в форматах CSV и NetCDF-4, и охватывают временной диапазон с 1970 по 2023 годы.

Обработка данных проводилась с использованием языка программирования Python. Для анализа использовались библиотеки netCDF4, numpy, pandas, sklearn, scipy, matplotlib, seaborn и plotly. Для каждой наблюдаемой точки были построены графики таких показателей, как BIAS, RMSE, когеренция, линейная регрессия и спектральная плотность методом Уэлча. В дальнейшем для комплексной оценки данных была построена диаграмма Тейлора.

## Результаты. Сравнение фактических данных и реанализа



Для оценки точности реанализа использовались показатели: корреляция (R), BIAS, RMSE и спектральная плотность. Корреляция ( $R \approx 1$ ) свидетельствует о высокой точности, BIAS – о средней систематической ошибке, а RMSE – о среднем отклонении данных. Спектральная плотность оценивает вклад различных частот в изменения уровня моря, что важно для анализа краткосрочных и сезонных колебаний.

Таблица 1. Статистические характеристики сравнения результатов части наблюдаемых данных и реанализа

Местоположение мареографа	Координаты		Страна	R	BIAS	RMSE
	Дол. в.д.	Шир. с.ш.				
Кронштадт	30.04	59.99	Россия	0.95	11.62	14.56
Выборг	28.7	60.7	Россия	0.95	9.47	12.92
Ристна	22.1	58.9	Россия	0.92	12.85	15.85
Горный институт	30.3	59.9	Россия	0.95	1.12	8.84
Хамина	27.2	60.56	Финляндия	0.94	11.60	14.35
Ханко	23.0	59.8	Финляндия	0.94	10.00	12.79
Хельсинки	25.0	60.2	Финляндия	0.94	10.79	13.53
Ломоносов	29.8	59.9	Россия	0.95	9.71	13.11
Гогланд	27.0	60.1	Россия	0.94	13.59	16.39
Нарва	28.06	59.55	Эстония	0.94	5.14	10.0
Балтийск	20.01	54.62	Россия	0.91	0.81	9.68
Калининград	20.23	54.99	Россия	0.90	-2.21	10.65
Краснофлотское	20.42	54.99	Россия	0.85	-0.65	12.60
Открытое	21.04	54.94	Россия	0.82	-5.63	15.69
Пионерский	20.37	54.94	Россия	0.92	2.84	9.86

В рамках проведенной валидации данных реанализа Baltic Sea Physics Reanalysis с наблюдениями, полученными на мареографах, были получены следующие результаты. По данным корреляционного анализа наблюдается высокая степень согласованности между реанализом и фактическими данными мареографов. Корреляция для



большинства точек составляет 0.92–0.95, что подтверждает способность модели адекватно воспроизводить долгосрочные колебания уровня моря (рис. 2).

Однако имеются сезонные колебания в точности модели, особенно в летние месяцы, где значения BIAS превышают 17 см (рис. 6). Это говорит о том, что реанализ недостаточно точно учитывает сезонные особенности региона.

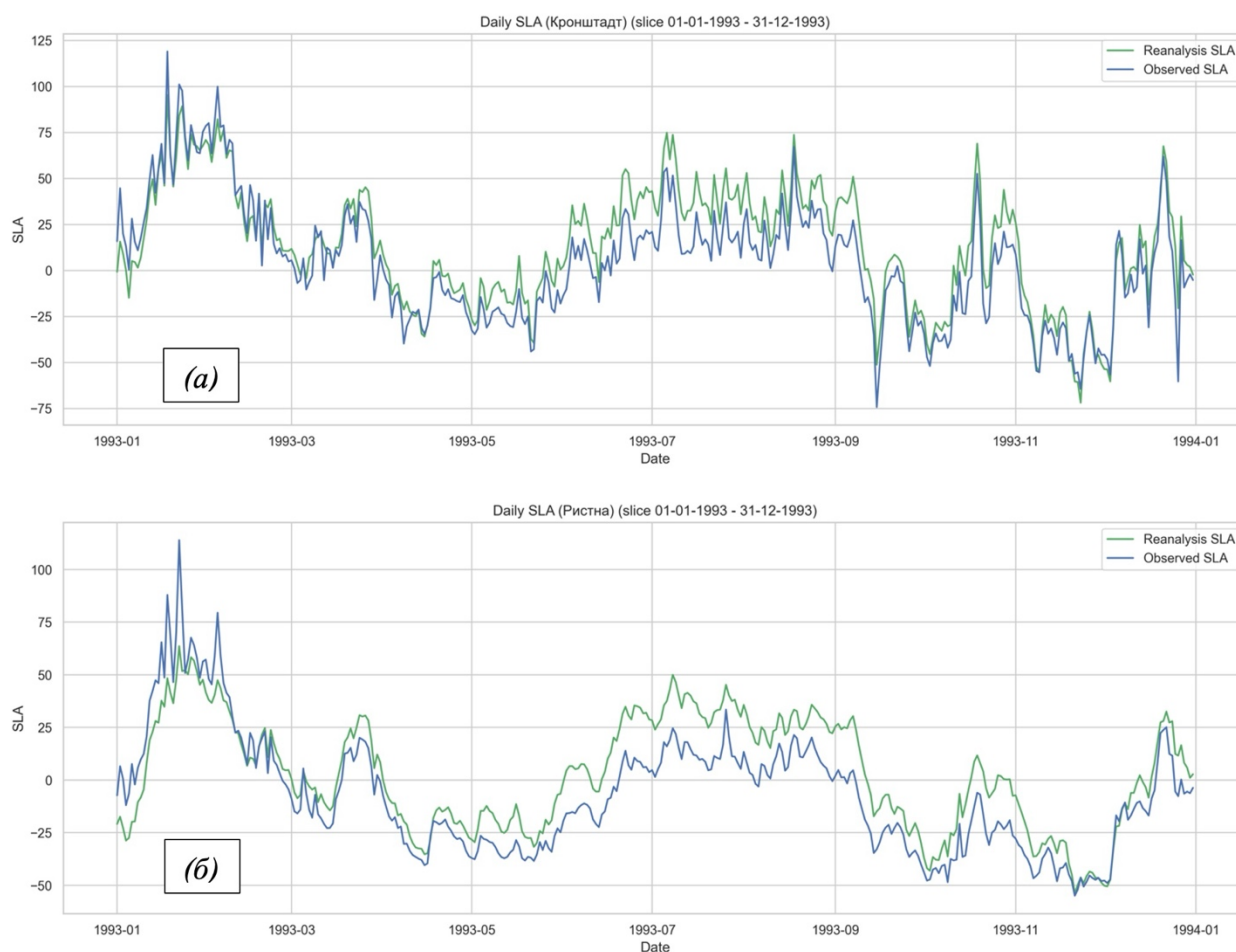


Рис. 2. Ежедневный SSH (Sea Surface Height) в течение года для а) Кронштадта б) Ростова

Диаграмма рассеяния (рис. 3) показывает, что коэффициент детерминации для Кронштадта  $R^2 = 0.91$ , то есть модель имеет высокую точность. Для Ростова коэффициент детерминации  $R^2 = 0.863$  показывает менее точное воспроизведение данных, особенно при высоких значениях уровня моря, где модель значительно занижает значения, что подтверждается наклоном линии.



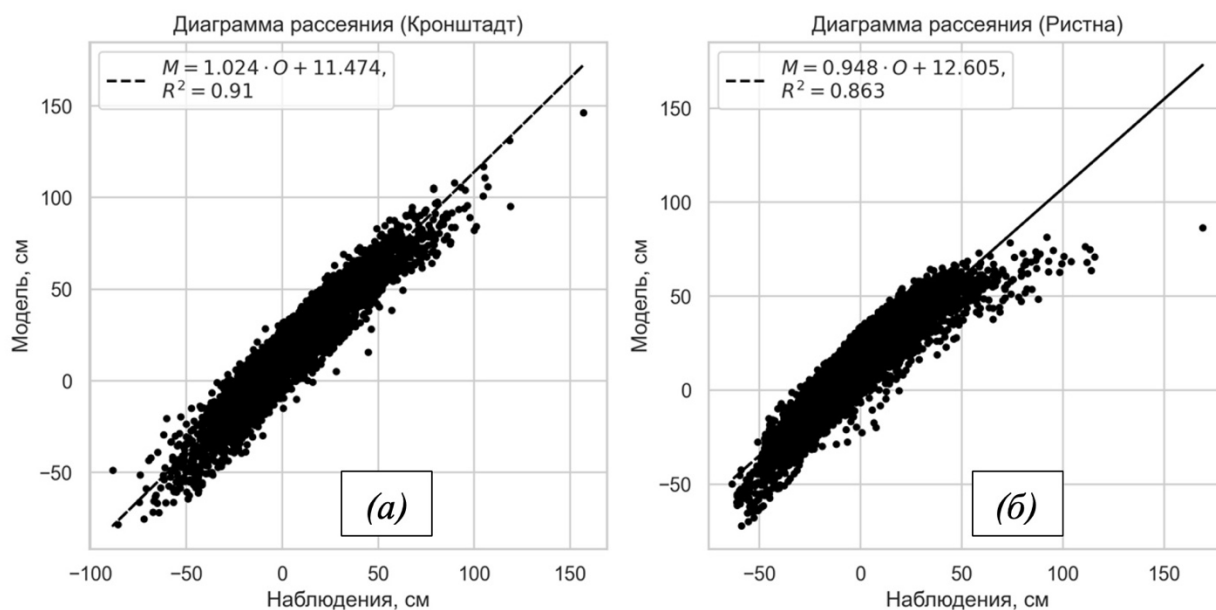


Рис 3. Графики линейной регрессии и диаграммы рассеяния для а) Кронштадта б) Ростова

Графики спектральной плотности (рис. 4) и когерентности (рис. 5) демонстрируют высокую когерентность в широком диапазоне частот, что подтверждает способность модели воспроизводить долгосрочные тренды. Но в то же время краткосрочные колебания, такие как сезонные изменения, воспроизводятся менее точно.

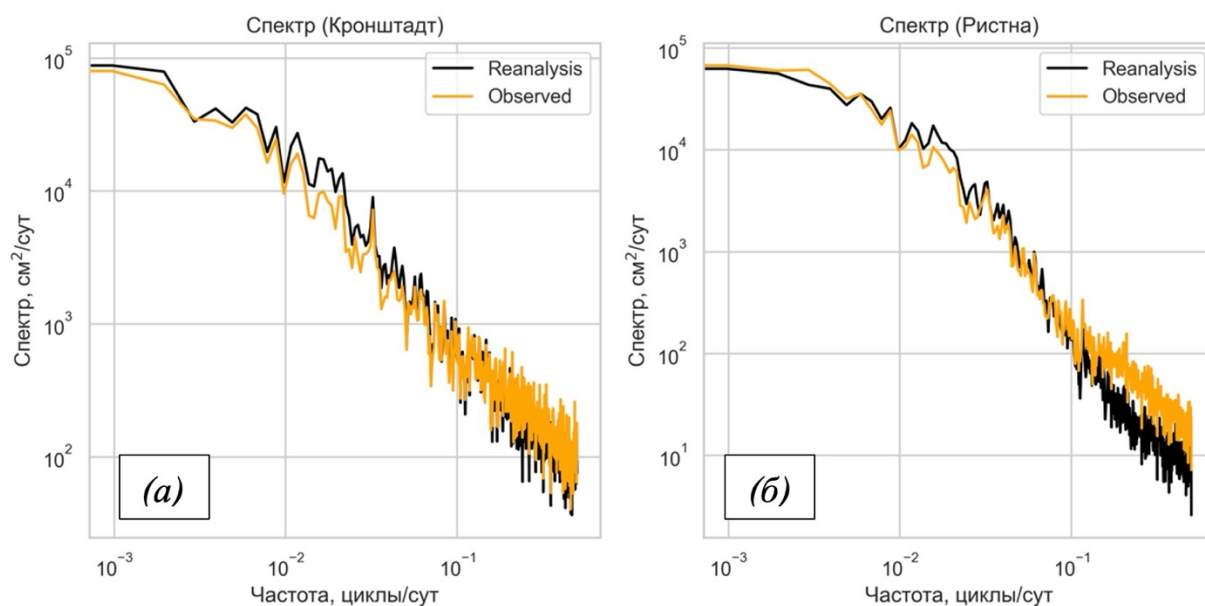


Рис. 4. Графики спектральной плотности для а) Кронштадта б) Ростова

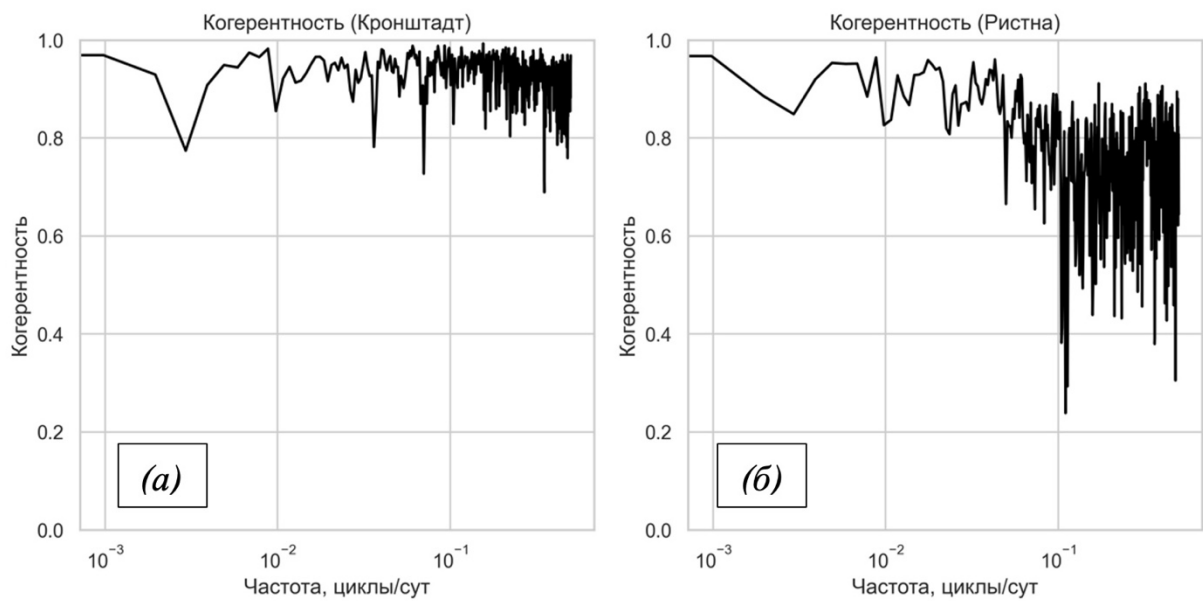


Рис. 5. Графики когерентности для а) Кронштадта б) Ристны

Зимой значения BIAS (рис. 6) и RMSE (рис. 7) минимальны (около 10 см), указывая на более высокую точность модели в этот период.

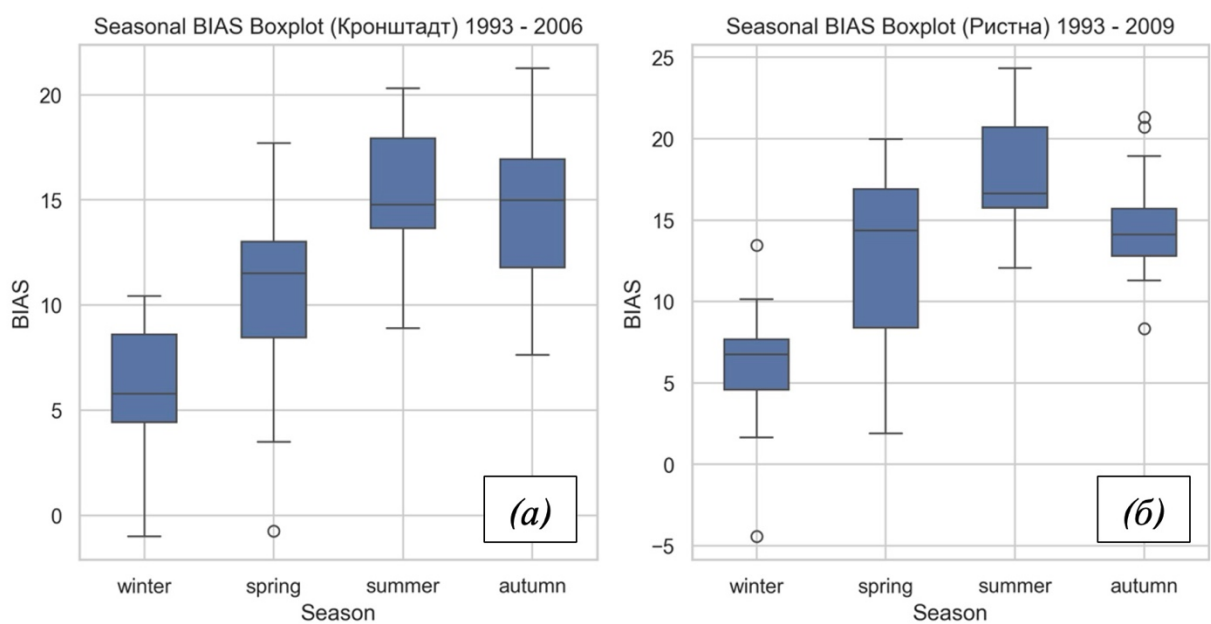


Рис. 6. Вохplot сезонных значений BIAS для а) Кронштадта б) Ристны

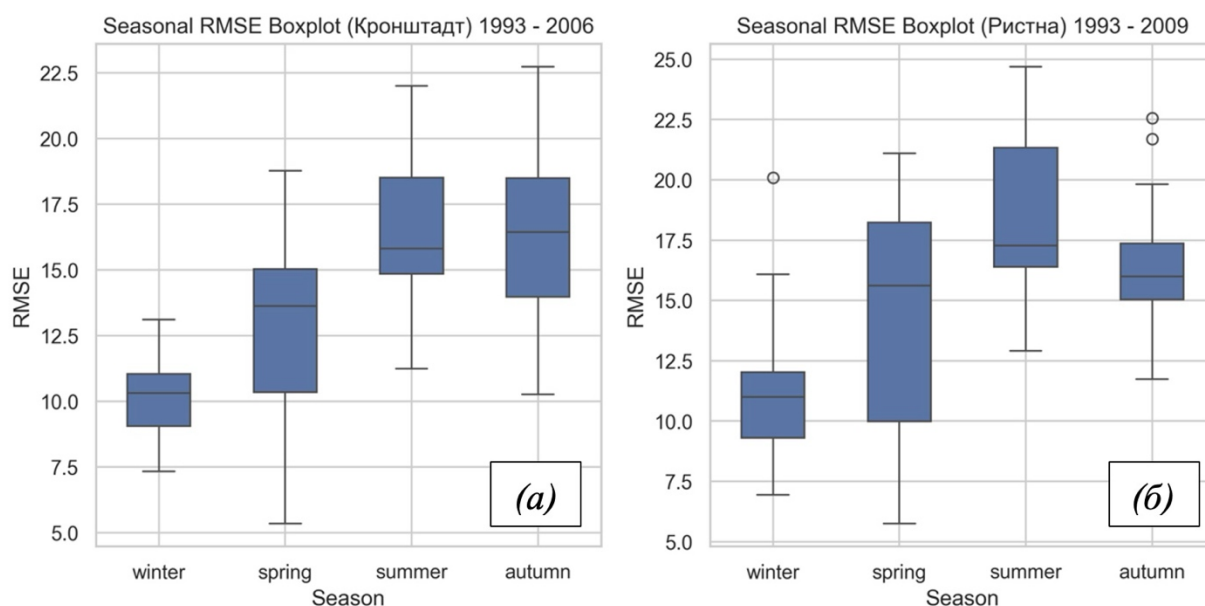


Рис. 7. Boxplot сезонных значений RMSE для а) Кронштадта б) Ристны

## Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что Baltic Sea Physics Reanalysis в целом достаточно точно воспроизводит долгосрочные колебания уровня Балтийского моря. Однако ключевым выводом является наличие значительных сезонных отклонений точности модели, особенно в летний период, когда BIAS и RMSE возрастают. Эти сезонные колебания требуют особого внимания при использовании данных реанализа для прогнозов и исследований в регионах с выраженной сезонной изменчивостью.

Таким образом, несмотря на общую точность модели, необходима ее дальнейшая настройка для учета сезонных факторов, особенно в точках экстремумов.

## Список литературы:

1. Данные реанализа Baltic Sea Physics Reanalysis BALTICSEA\_MULTIYEAR\_PHY\_003\_011 [Электронный ресурс]. URL: [https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA\\_MULTIYEAR\\_PHY\\_003\\_011/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/description) (дата обращения: 04.09.2024).
2. Global Extreme Sea Level Analysis Data (GESLA) [Электронный ресурс]. URL: <https://gesla787883612.wordpress.com/> (дата обращения: 04.09.2024).
3. Quality information document. Baltic Sea Production Centre BALTICSEA\_MULTIYEAR\_PHY\_003\_011 [Электронный ресурс]. URL: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-BAL-QUID-003-011.pdf> (дата обращения: 04.09.2024).
4. PRODUCT USER MANUAL For Baltic Sea Product [Электронный ресурс]. URL: <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-BAL-PUM-003-011-012.pdf> (дата обращения: 04.09.2024).