

ВАЛИДАЦИЯ МАССИВОВ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ  
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ИЗ BALTIC SEA PHYSICS REANALYSIS ПО  
ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА БЕРЕГОВЫХ МАРЕОГРАФАХ

VALIDATION OF ARRAYS OF THE BALTIC SEA LEVEL VARIATIONS FROM BALTIC  
SEA PHYSICS REANALYSIS BASED ON OBSERVATIONS ON COASTAL TIDE  
GAUGES

**Боровец Николай Васильевич<sup>1</sup>, Медведев Игорь Павлович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> МФТИ, Москва

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

**Borovets Nikolay Vasilyevich<sup>1</sup>, Medvedev Igor Pavlovich<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> MIPT, Moscow

<sup>2</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

## **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 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 планируется оценить, насколько данные реанализа адекватно воспроизводят фактические изменения уровня 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.

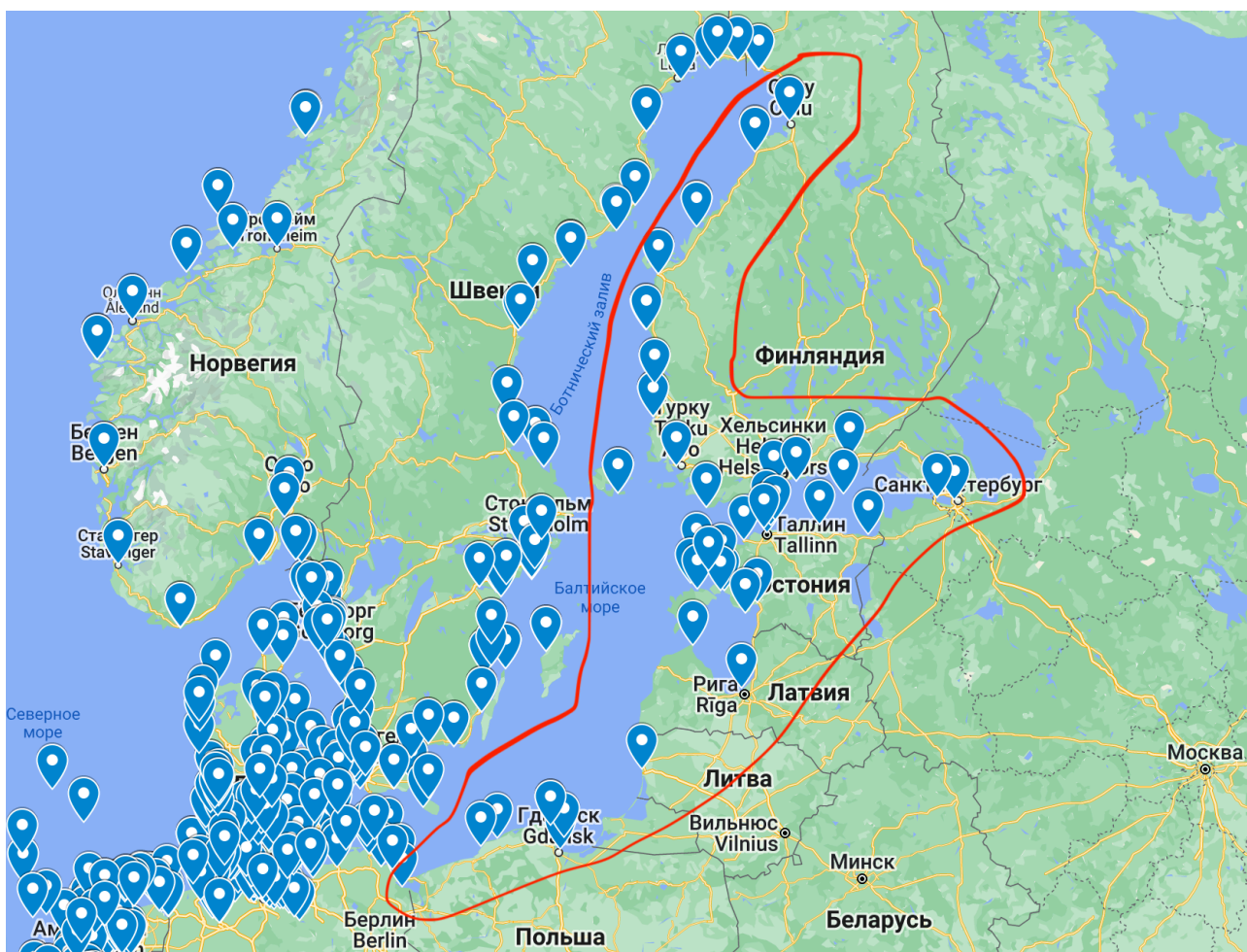


Рис. 1. Область исследования и примерное расположение ~60 мареографов, данные которых использовались для валидации ([GESLA](#)).

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 данных реанализа по сравнению с фактическими наблюдениями были использованы следующие показатели: корреляция (R),

BIAS, RMSE и спектральная плотность. Корреляция показывает степень согласованности между модельными и фактическими данными, где значения R, близкие к 1, указывают на высокую точность модели. BIAS характеризует среднюю систематическую ошибку, показывая, насколько модельные данные отклоняются в сторону завышения или занижения по сравнению с наблюдаемыми значениями. RMSE является важным параметром точности модели, характеризует среднеквадратическую ошибку, то есть отражает среднее отклонение модельных данных от фактических. Спектральная плотность помогает оценить вклад различных частот в изменения уровня моря, что очень 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.

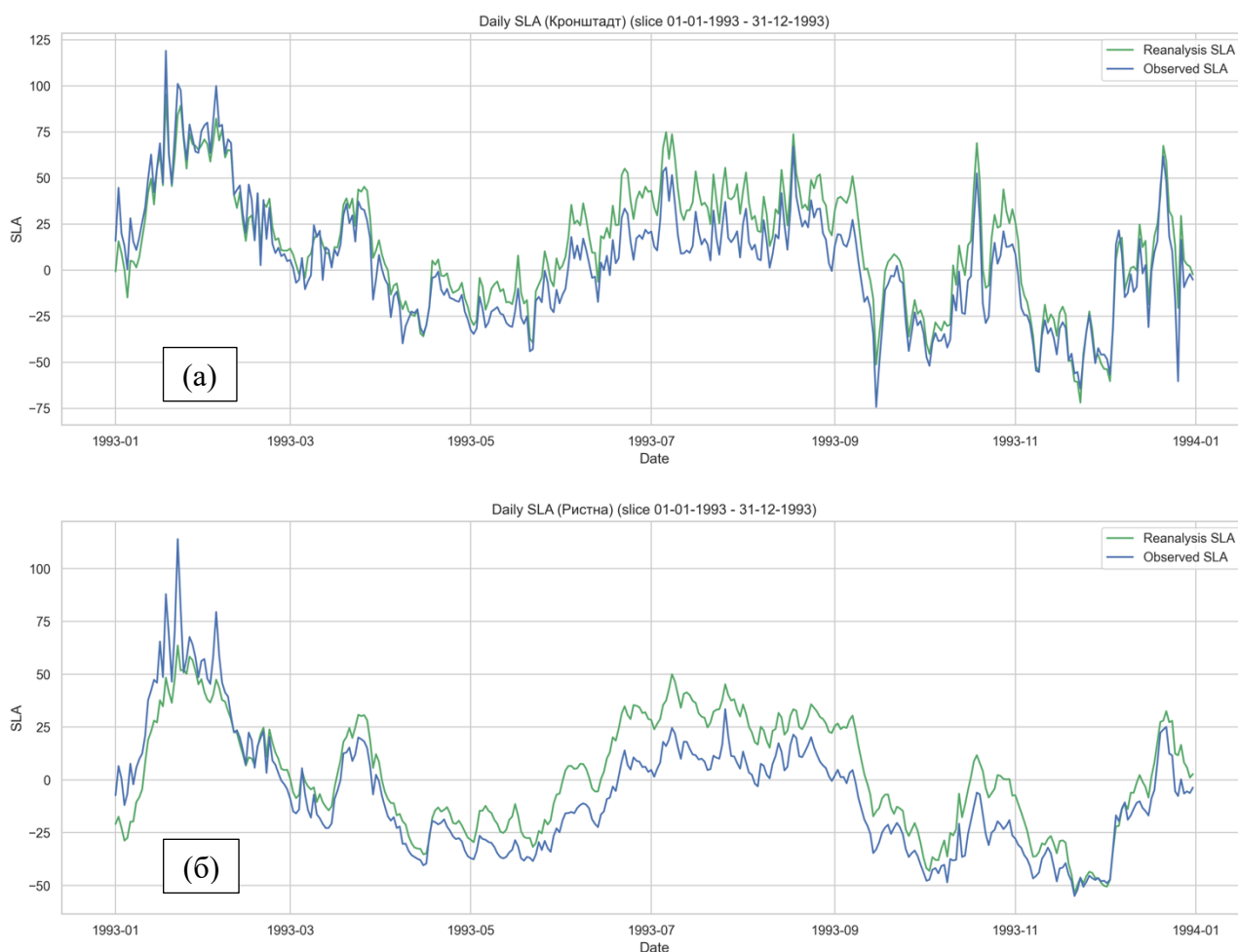


Рис. 2. Ежедневный SSH (Sea Surface Height) в течение года для а) Кронштадта б) Ристны

Диаграмма рассеяния (рис. 3) показывает, что коэффициент детерминации для Кронштадта  $R^2 = 0.91$ , то есть модель имеет высокую точность. Для Ристны 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.

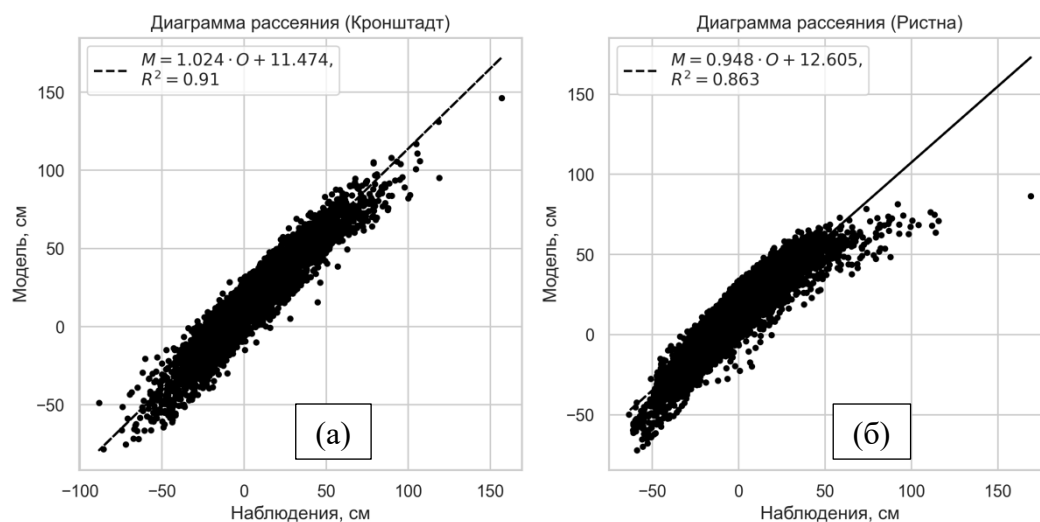


Рис 3. Графики линейной регрессии и диаграммы рассеяния для а) Кронштадта б) Ристны

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.

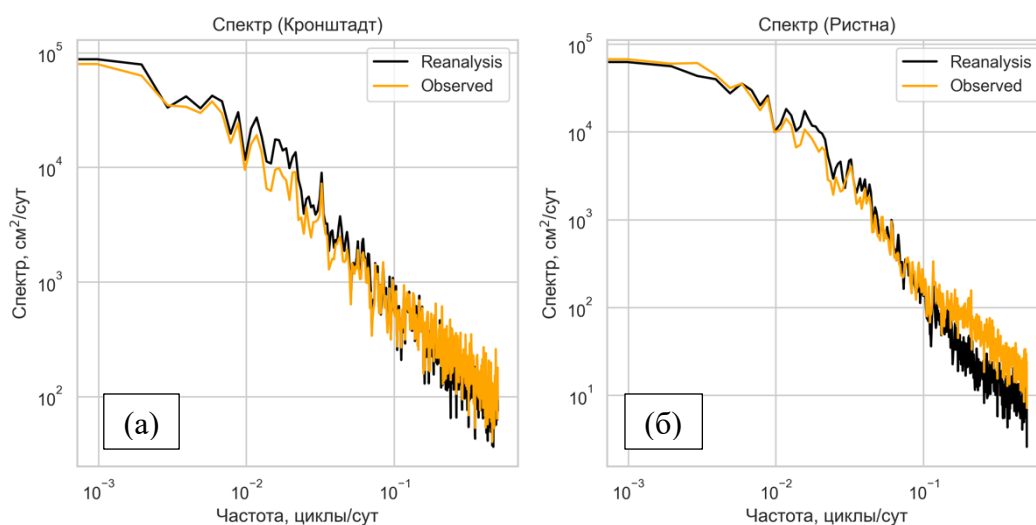


Рис. 4. Графики спектральной плотности для а) Кронштадта б) Ристны

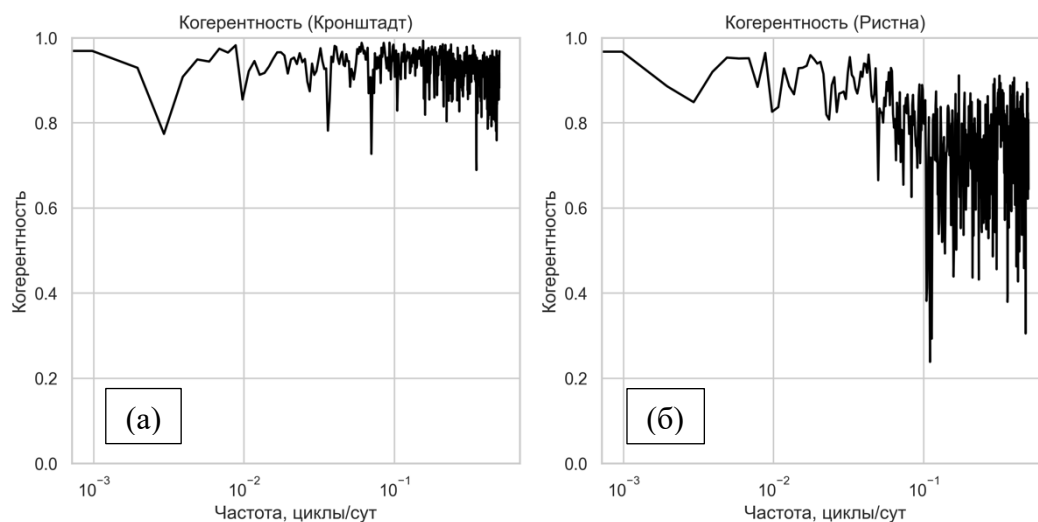


Рис. 5. Графики когерентности для а) Кронштадта б) Ростова

Показатели BIAS (рис. 6) и RMSE (рис. 7) демонстрируют хорошие результаты в зимний период, когда величина ошибки минимальна и составляет около 10 см для большинства точек наблюдения, что указывает на более высокую точность модели в зимних физических условиях.

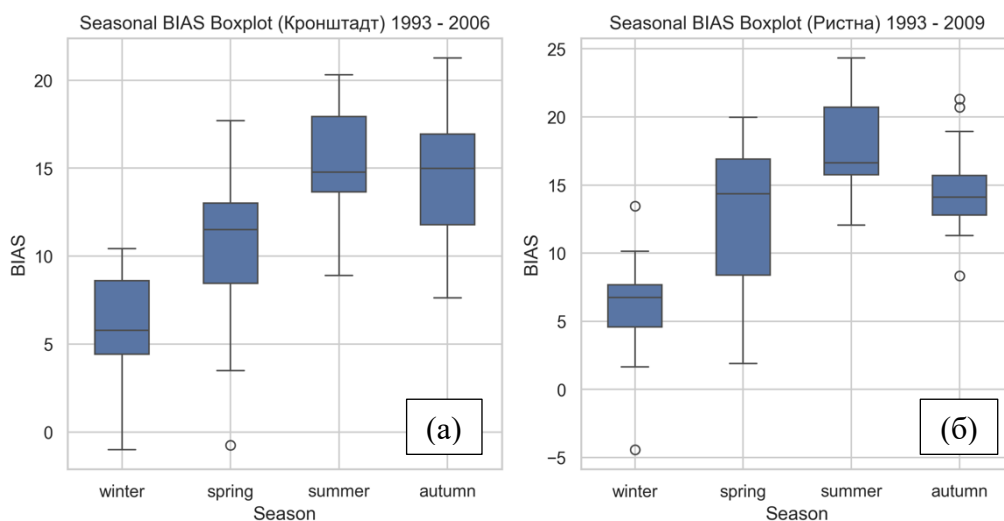


Рис. 6. Вохplot сезонных значений BIAS для а) Кронштадта б) Ростова



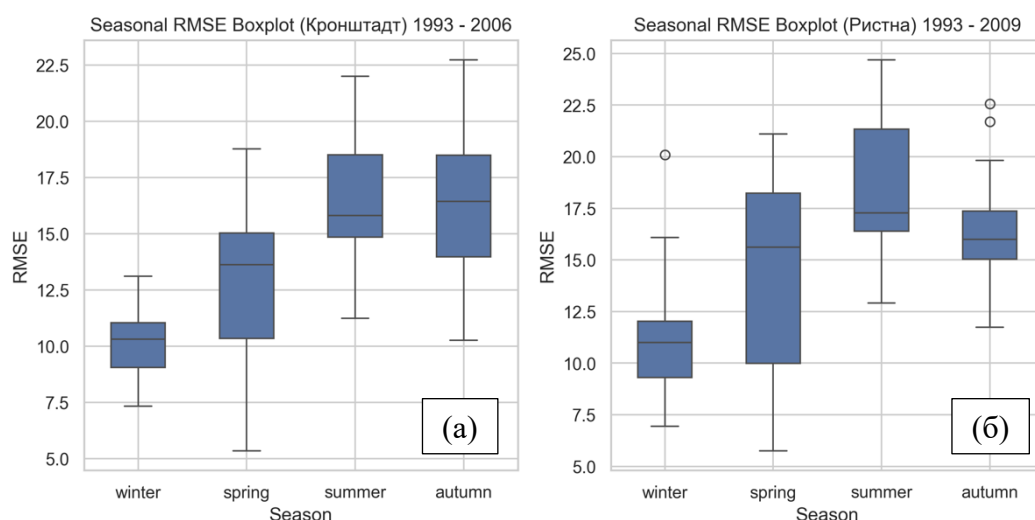


Рис. 7. Boxplot сезонных значений RMSE для а) Кронштадта б) Ристны

## 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.

## Финансирование

Работа поддержана и выполнена в рамках научной стажировки Плавучего Университета.

## Список литературы:

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