

Статья принята в печать и будет опубликована в журнале:  
«Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле»



**Особенности изменчивости термохалинной структуры и динамики вод Балтийского моря при формировании и распространении большого залива в декабре 2014 года**

*Захарчук Евгений Александрович, Виноградов Михаил*

*Владимирович, Сухачев Владимир Николаевич, Тихонова Наталья Александровна,*

*Травкин Владимир Станиславович, Улейский Михаил Юрьевич*

DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.407>

Дата получения рукописи: 28.03.2024

Дата принятия рукописи в печать: 18.09.2024

**Для цитирования:** Захарчук, Е. А., Виноградов, М. В., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А., Травкин, В. С., Улейский, М. Ю. (2024) Особенности изменчивости термохалинной структуры и динамики вод Балтийского моря при формировании и распространении большого залива в декабре 2014 года. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (4). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.407>

Это неотредактированный файл принятой к публикации рукописи. До публикации в окончательном виде она будет подвергнута редактированию и верстке. Обратите внимание, что во время производственного процесса могут быть выявлены ошибки, влияющие на содержание. К данной рукописи применяются все правовые оговорки, относящиеся к журналу.

УДК 556

**Особенности изменчивости термохалинной структуры и динамики вод Балтийского моря при формировании и распространении большого залива в декабре 2014 года<sup>1</sup>**

*Захарчук Евгений Александрович<sup>1</sup>, Виноградов Михаил Владимирович<sup>1,2</sup>, Сухачев Владимир Николаевич<sup>1,2</sup>, Тихонова Наталья Александровна<sup>1,2</sup>, Травкин Владимир Станиславович<sup>1,2</sup>, Улейский Михаил Юрьевич<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Государственный университет, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9, 199034

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., д.6

<sup>3</sup>Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева, Россия, Владивосток, Балтийская, д. 43, 690041

Захарчук Е. А. (eazakharchuk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6079-5739>),

Виноградов М. В. (vinogradovm2000@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-3744-8204>),

Сухачев В. Н. (syhachev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4821-4342>),

Тихонова Н. А. (nata-tik@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4546-4920>),

Травкин В. С. (vtravkin99@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7254-9313>)

Улейский М. Ю. (uleysky@poi.dvo.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6499-1470>)

**Аннотация**

На основе данных регионального реанализа гидрофизических полей Baltic Sea Physics Analysis and Forecast (BSPAF) и инструментальных измерений уровня моря и солёности исследуются особенности термохалинной структуры и динамики вод в Балтийском море во время распространения большого балтийского залива (ББЗ) солёных североморских вод, произошедшего в декабре 2014 г. Максимальный перепад уровня моря между Каттегатом и юго-западной Балтикой во время ББЗ в декабре 2014 г.

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-27-00412 «Уточнение механизмов генерации и нестационарности больших балтийских заливок».

составил 100 см. Показано, что хотя в ББЗ 2014 года основное влияние оказывает баротропная компонента, но в наблюдающиеся уклоны уровня моря в Датских проливах во время ББЗ заметный вклад вносят уклоны, вызванные неоднородностью поля плотности морской воды, которые уменьшают суммарный уклон уровня моря. Вертикальные профили плотности воды и течений во время ББЗ демонстрируют сохранение в Датских проливах стратификации и наличие однонаправленного потока из Каттегата в Балтику, со скоростями на поверхности 1.0-1.2 м/с и у дна 0.10-0.30 м/с. Значительные вертикальные градиенты скорости течений обусловлены влиянием бароклинной компоненты, скорости которой достигают 0.2 – 0.6 м/с. Оценки водообмена свидетельствуют, что за весь период ББЗ в юго-западную Балтику прошло 243.7 км<sup>3</sup> каттегатских вод, что согласуется с более ранними расчетами, выполненными с помощью других методов. Анализ изменений во времени придонной солёности на трёх разрезах в Балтийском море, а также результатов лагранжева моделирования движения маркеров, показывает, что в течение одного года после ББЗ его трансформированные воды распространялись через юго-западную Балтику, восточный Готландский бассейн в северную часть открытой Балтики, где они повернули в циклоническом направлении и достигли Ландсортской впадины. Спустя 15 месяцев маркеры прошли в центральную часть Финского залива, а через 2 года их небольшие части проникли в Рижский залив и, через Аландскую впадину, подошли к Ботническому заливу.

**Ключевые слова:** Балтийское море, Датские проливы, большой балтийский заток, региональный реанализ гидрофизических полей, водообмен, течения, солёность воды, уровень моря, стратификация, лагранжево моделирование.

## 1. Введение

Впервые, термин «большой балтийский заток» (Major Baltic Inflow) был использован Робертом Диксоном в 1973 году (Dickson, 1973) применительно к интенсивным затокам высокосолёных североморских вод в Балтийское море с объемами от 90 до более 200 км<sup>3</sup> (Matthäus, 2006). Слабые внедрения североморских вод в Балтику с объёмами 10 – 20 км<sup>3</sup> происходят часто, но они не оказывают значительного влияния на океанологический режим глубинных вод центральной части Балтийского моря (Matthäus, 2006). Случаи появления больших балтийских заток (ББЗ) весьма эпизодичны и отмечаются в подавляющем числе случаев только в осенне-зимний период (наиболее часто между ноябрём и январём) при определенных гидрометеорологических

условиях, однако, при этом, высокосолёные и богатые кислородом воды ББЗ проникают далеко в открытую часть Балтийского моря, обновляя придонные и глубинные воды глубоководных впадин, и оказывая определяющее влияние на эволюцию экосистемы моря (Leppäranta and Myrberg, 2009; Matthäus, 2006; Антонов, 1978; Иванова, 1989; Литина et al., 2020; Терзиев et al., 1992). Согласно оценкам (Matthäus, 2006), продолжительность больших затоков варьирует от 6 до 29 суток, но при этом их объём может составлять значительную часть от результирующего годового водообмена между Северным и Балтийским морями. По данным К. Виртки, в ноябре-декабре 1951 г. во время ББЗ через Датские проливы прошло около 200 км<sup>3</sup> каттегатских вод, что составило 40 % годовой нормы (Wyrтки, 1953).

С 1880-х по начало 1980-х годов ББЗ наблюдались сравнительно часто – случаи их появления варьировались в основном от одного-двух раз в год до одного раза в 3-4 года (Fischer and Matthäus, 1996; Matthäus, 2006; Mohrholz et al., 2015; Захарчук et al., 2017a). В последние десятилетия отмечаются очень заметные изменения в водообмене между Балтийским и Северным морями: после 1983 года частота больших балтийских затоков сократилась в несколько раз по сравнению с предшествующим вековым периодом инструментальных измерений; интервал между ними, который ещё называют периодом стагнации (Leppäranta and Myrberg, 2009), стал составлять 10-11 лет. Предпоследний большой заток произошёл в 2003 году, после чего в течение 11 лет это явление не наблюдалось. Последний большой заток произошёл в декабре 2014 года и, по оценкам немецких исследователей, он был третьим в ряду самых больших затоков (Mohrholz et al., 2015). Столь заметные изменения в водообмене между двумя морями не могли не повлиять на океанологический режим мелководного, почти замкнутого солоноватого бассейна, каким является Балтийское море, а также на функционирование его экосистемы.

В последние годы появились работы, в которых высказываются сомнения, по поводу резкого сокращения количества больших балтийских затоков в последние десятилетия. В. Морхольц объяснял резкое сокращение ББЗ в последние десятилетия чисто техническими причинами: отсутствием инструментальных наблюдений в этот период на отдельных станциях мониторинга и сменой их местоположения, а также регистрирующего оборудования (Mohrholz, 2018). Оценивая расходы в Датских проливах по разности уровня моря в Каттегате и на юго-западе Балтики, В. Морхольц приходит к выводу, что количество больших затоков не изменилось (Mohrholz, 2018). На наш взгляд, его методические подходы и интерпретация результатов - весьма

дискуссионны. В. Морхольц использовал для расчета затоков примитивный метод, разработанный почти 40 лет назад. В рамках этого метода баротропный перенос объёмов солёных вод из Северного моря в Балтийское рассчитывается по разности уровня между п. Хорнбаек на юго-востоке пр. Каттегат и п. Гедсер, расположенном на выходе из Малых Датских проливов в юго-западной части Балтики (Mohrholz, 2018). Однако, во время больших затоков следует оценивать градиент уровня не только между Каттегатом и п. Гедсер, но и дальше по пути следования больших затоков в открытой Балтике. Кроме того, В. Морхольц использовал 10-суточное сглаживание данных по уровню моря, хотя хорошо известно, что периоды больших затоков меняются от 6 до 29 суток (Matthäus, 2006). Далее, В. Морхольц сравнивает свои результаты с изменением солёности и кислорода только в Борнхольмской впадине, однако, далеко не все затоки, достигшие Борнхольмской впадины, распространяются дальше, и достигают Готландской впадины. Ещё один довод В. Морхольца, отрицающий сокращение событий ББЗ в последние десятилетия, сводится к тому, что в Балтике в этот период не происходит уменьшения солёности (Mohrholz, 2018). Это действительно так и, более того, современные исследования показывают, что в последние десятилетия отмечается осолонение вод открытой Балтики и Финского залива (Lehmann et al., 2022; Захарчук et al., 2023, 2017b, 2017a). Однако, увеличение солёности вод Балтийского моря, на фоне резкого сокращения количества ББЗ, может быть связано с влиянием процессов других временных масштабов. Балтийское море имеет положительный пресный баланс: количество осадков и материкового стока почти в 4 раза превосходит количество пресной воды, которое изымается в процессе испарения (Leppäranta and Myrberg, 2009). Это приводит к двухслойной средней циркуляции. В поверхностном слое из-за избытка поступления пресных вод происходит постоянный отток вод из Балтийского в Северное море, а в придонном слое возникает компенсационное течение, направленное из Северного моря в Балтийское. В последние десятилетия в Балтийском море отмечается увеличение атмосферных осадков и речного стока (Захарчук et al., 2023). Это должно приводить к усилению средней двухслойной циркуляции вод, в результате которого в придонном слое происходит увеличение поступления солёных вод из Северного моря в Балтийское. Результаты исследований разных авторов также показывают, что с 1995 года происходит осолонение вод Северного моря (Hughes et al., 2012; Quante et al., 2016), которое передаётся через процесс водообмена глубинным и придонным водным массам открытой Балтики (Lehmann et al., 2022).

Водообмен между Северным и Балтийским морями, осуществляющийся через узкие и мелководные Датские проливы, может разделяться на три составляющие (Matthäus, 2006; Mohrholz et al., 2015; Захарчук et al., 2017a). Во-первых, в верхнем слое происходит почти постоянный отток из Балтийского моря солоноватой воды объёмом около  $15000 \text{ м}^3/\text{с}$ , имеющей солёность 7‰. Этот поток, направленный в пролив Каттегат, обусловлен избытком поступления пресных вод от рек, впадающих в Балтийское море, и выпадающих атмосферных осадков (Hordoir and Meier, 2010). Во-вторых, за счёт значительной неоднородности поля плотности водной массы Датских проливов там формируется бароклинный градиент давления, связанный с разностью солёности в 20-25‰ между пр. Каттегат (34 ‰) и Арконским бассейном Балтийского моря (7 ‰), и приводящий к бароклиным притокам солёной воды в Балтийское море (Reissmann et al., 2009; Sellschopp et al., 2006). Согласно наблюдениям, бароклинные затоки появляются во время устойчивых, но слабых ветров, дующих более 14 дней (обычно в конце лета), и характеризуются значительной стратификацией в юго-западной части Балтики. Баротропные уклоны уровня моря между проливом Каттегат и Балтийским морем сопровождаются притоком солёной Каттегатской воды в западную часть Балтийского моря. Именно с последним механизмом в зарубежной литературе и связывают большие балтийские затоки (Matthäus and Franck, 1992; Mohrholz, 2018). На основании современных наблюдений и модельных исследований ученые приходят к выводу, что перенос соли, связанный с бароклиными затоками, по крайней мере в 5-10 раз меньше по сравнению с баротропными затоками (Feistel et al., 2004; Meier et al., 2004). Согласно работам Маттеуса и Франка (Matthäus and Franck, 1992), большие затоки идентифицировались, если придонная солёность на плавмаяке Gedser Rev в юго-западной части моря становилась выше 17 ‰ более пяти дней подряд, а вертикальная стратификация почти отсутствовала.

Процесс формирования большого затока принято делить на 4 основных периода: период оттока Балтийских вод (outflow period), предшествующий затокам период (precursory period), основной период затока (main inflow period) и период после затока (post-inflow period) (Matthäus, 2006; Mohrholz, 2018; Mohrholz et al., 2015). Период оттока формируется, когда над Балтийским морем отмечаются восточные переносы воздушных масс, что приводит, сначала, к нагону уровня на юго-западе Балтики и стону уровня в Каттегате. Из-за образовавшегося уклона уровня и восточных ветров начинается отток воды из Балтики в Северное море, который приводит к понижению уровня Балтийского моря. В предшествующий затокам период синоптические условия меняются: восточные

ветры сменяются интенсивными и продолжительными (около 2-3 недель) ветрами западных направлений, под действием которых происходит значительный нагон атлантических вод в Северное море, в результате чего уровень моря в Каттегате начинает повышаться, пока не сравняется с уровнем в юго-западной Балтике. Основной период затора начинается, когда под действием продолжающихся интенсивных западных ветров уровень моря в Каттегате становится выше, чем на юго-западе Балтики и продолжает повышаться, что приводит к поступлению больших объёмов солёных каттегатских вод через Датские проливы в Балтику и повышению её уровня. Исследования показывают, что во время большого затора перепад уровня между проливом Каттегат и юго-западной частью Балтики может достигать 1.0 - 1.7 метра (Madsen and Højerslev, 2009). Большой затор продолжается, пока уровни моря в Каттегате и на юго-западе Балтики не выровняются. В период после затора западные ветры ослабевают и североморские воды перестают накапливаться в Датских проливах. Так как уровень Балтики повышен, относительно уровня Северного моря, начинается отток воды из Балтийского моря и его уровень понижается до состояния близкого к среднему значению (Mohrholz, 2018; Mohrholz et al., 2015).

В работах Виртки и Диксона (Dickson, 1973; Wyrтки, 1953) отмечалось, что необходимым предварительным условием для развития интенсивного затора должно быть формирование положительной аномалии солёности в глубинных слоях пр. Каттегат. Однако, позже, специальные исследования Маттеуса и Франка (Matthaus and Franck, 1989) опровергли это заключение: перед большими заторами в пр. Каттегат наблюдались, как положительные, так и отрицательные аномалии солёности.

До настоящего времени, плохо изученными остаются особенности изменчивости океанологических процессов в периоды формирования ББЗ и пути распространения солёных североморских вод в Балтийском море во время и после ББЗ. В частности, не совсем ясно, через какое время трансформированные воды ББЗ попадают в Западный Готландский бассейн, а также Финский залив, и достигают ли они Рижского и Ботнического заливов. Традиционные данные судовых океанографических съёмки и разрезов не репрезентативны для изучения процессов синоптического масштаба, к которым относятся ББЗ, так как эти измерения не синхронны, эпизодичны во времени и ограничены в пространстве. Значительное развитие в последние десятилетия численного гидродинамического моделирования океанов и морей с использованием алгоритмов усвоения судовых и спутниковых данных определило новый, более представительный путь исследования ББЗ с помощью данных реанализа

гидрофизических полей. Поэтому, основная цель работы – исследовать с помощью контактных гидрологических измерений и современных данных регионального реанализа гидрофизических полей особенности изменчивости термохалинной структуры и динамики вод Балтийского моря во время формирования и распространения большого балтийского залива (ББЗ) солёных североморских вод, произошедшего в декабре 2014 г.

## 2. Данные и методы

Для изучения пространственно-временной структуры большого залива солёных североморских вод в декабре 2014 года использовались следующие данные:

- 1) значения температуры, солёности воды и скорости и направления течений на разных горизонтах в Балтийском море, полученные в рамках регионального реанализа гидрофизических полей Baltic Sea Physics Analysis and Forecast (BSPAF) (<https://doi.org/10.48670/moi-00013>) (Liu et al., 2019), основанного на численной реализации гидродинамической модели NEMO 3,6 (Nucleus for European Modeling of the Ocean) (Hordoir et al., 2015; Pemberton et al., 2017), для условий Балтийского моря, в которой используется процедура ассимиляции контактной и спутниковой информации на основе алгоритма одной из разновидностей фильтра Кальмана (Local singular evolutive interpolated Kalman (LSEIK) filter (Nerger et al., 2005). В качестве ассимилируемых переменных в модели NEMO 3,6 использовались спутниковые данные поверхностной температуры воды, полученные ледовой службой в SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), а также in-situ измерения температуры и солёности из базы данных ICES [<http://www.ices.dk>]. Для задания граничных условий на поверхности моря использовались данные метеорологических характеристик, рассчитанные с помощью атмосферной модели ECMWF ERA5. Данные регионального реанализа имеют суточное осреднение, разрешение по горизонтали 3,9 км и 56 горизонтов по вертикали (толщина слоев меняется в зависимости от глубины от 3 до 22 м) и охватывают период с 1993 по 2022 гг.
- 2) Мареографные измерения уровня моря на станциях Хорнбаек и Гедсер за период с 1 ноября 2014 по 31 декабря 2015 года с интервалом 15 минут, которые были осреднены до одних суток.
- 3) Для валидации данных реанализа использовались контактные измерения солёности на разных горизонтах стационарных автоматических станций Дарсс Силл и Аркона,



установленных на юго-западе Балтики на глубинах, соответственно, 21 и 45 м (рис. 1).

- 4) Для оценок атмосферного давления во время ББЗ использовались данные реанализа метеорологических полей ERA5 с пространственным разрешением 0.25 x 0.25 градусов (Hersbach et al., 2020).

Количественные оценки водообмена ( $Q$ ) через проливы Зунд и Большой Бельт в периоды формирования большого балтийского залива 2014 года производилась по формуле (1) на основе данных регионального реанализа BSPAF о скоростях течений ( $V$ ) на разных горизонтах вдоль разрезов, пересекающих проливы (см. рис. 1).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m VS \quad (1)$$

где,  $n$  – количество ячеек  $i$  на разрезе;  $m$  – количество горизонтов  $z$  в данной ячейке;  $V$  – меридиональная составляющая скорости течения в ячейке реанализа, на горизонте  $z$ ;  $S$  – площадь сечения ячейки, которая определялась, как произведение толщины слоя ( $\Delta z$ ) на расстояние, между соседними узлами реанализа ( $\Delta i$ ), т.е.  $S = \Delta z * \Delta i$ .

Выделение бароклинной компоненты течений было выполнено по методике, изложенной в работе (Первунина et al., 1955), путём исключения из каждого профиля среднего по вертикали (кроме придонного горизонта) вектора скорости течений. Этот подход использовался в работе (Первунина et al., 1955) для выделения баротропного приливного течения по данным измерений скорости и направления течений на разных горизонтах буйковых станциях. Работоспособность этого метода проверялась нами ранее, путём численных экспериментов с бароклинной и баротропной версиями гидродинамической модели Балтийского моря при одних и тех же граничных условиях, вычитая из результатов бароклинной задачи результат баротропного решения (Захарчук et al., 2017b). Такие эксперименты проводились нами для случаев штормовых нагонов в трёх районах Финского залива в осенне-зимние периоды, где производились длительные измерения течений с помощью акустических доплеровских профилографов ADCP (Захарчук et al., 2017b). Сравнение результатов численных экспериментов с результатами, полученными на основе анализа измерений течений, показало хорошее согласие (Захарчук et al., 2017b).

Для исследования особенностей распространения вод ББЗ по акватории моря использовались 2 метода.

С помощью первого метода были построены 3 океанологических разреза, проходящих по системе взаимосвязанных глубоководных впадин морского рельефа. Их расположение определялось, исходя из опубликованных сведений о путях миграции солёных североморских вод во время ББЗ в Балтийском море (Markus Meier, 2007; Matthäus, 2006; Mohrholz et al., 2015). Используя данные регионального реанализа, на всех трёх разрезах строились диаграммы временной изменчивости солёности в придонном слое (см. рис. 8).

Во втором случае применялся лагранжев метод, подробное описание которого дано в монографии (Prants et al., 2017). Суть данного метода заключается в ежесуточном размещении большого числа пассивных маркеров (5000 шт.), имитирующих воды со специфичными океанографическими характеристиками, на отрезке вдоль границы севернее Датских проливов (56.6° с.ш. 10.85° в.д. – 56.6° с.ш., 11° в.д.) в период с 1 ноября по 31 декабря 2014 г (рис. 9). В дальнейшем по известному полю скорости модели NEMO для каждого маркера производится расчёт его траектории на период времени 2 года. Такой способ ранее успешно применялся для моделирования путей переноса радиоактивного загрязнения с АЭС «Фукусима» (Budyansky et al., 2024), поиска наиболее благоприятных промысловых районов (Prants et al., 2021), а также при определении границ речного плюма р. Амазонка (Morozov et al., 2024).

Лагранжевы траектории рассчитывались при помощи уравнения адвекции:

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t),$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t),$$

где  $u$  и  $v$  это угловые компоненты скорости течений поля NEMO в предпоследнем  $\sigma$ -слое по глубине,  $\varphi$  и  $\lambda$  обозначают широту и долготу, соответственно. Угловые скорости используются для упрощения уравнения движения на сфере. Значения скорости внутри ячеек сетки рассчитывались при помощи бикубической интерполяции по пространству и интерполяции полиномом Лагранжа третьей степени по времени. При моделировании лагранжевых траекторий вышеуказанные уравнения интегрируются по схеме Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом по времени (0.001 сут.) (Prants, 2015).

Для оценки изменения стратификации в датских проливах во время формирования ББЗ по данным реанализа о температуре и солёности на разных

горизонтах рассчитывалась плотность воды. Для этого использовалось уравнение состояния, описанное в работе (Jackett and Mcdougall, 1995).

### 3. Результаты и их обсуждение

#### 3.1. Сравнение изменений солёности по данным реанализа BSPAF с измерениями на станциях Дарсс Силл и Аркона.

На рис. 2 представлены изменения во времени вертикальных профилей солёности, измеренных на автоматических станциях Дарсс Силл и Аркона (см. рис. 1), и по данным регионального реанализа BSPAF за период с 1 ноября по 31 декабря 2014 г., а в таблице 1 для сравнения показаны оценки статистических характеристик измеренных и модельных значений солёности. Видно, что ББЗ 2014 года воспроизводится по данным регионального реанализа. Коэффициенты корреляции между измеренными и модельными рядами солёности на разных горизонтах высокие, и варьируют от 0.71 до 0.90 в районе станции Дарсс Силл (см. табл. 1) и 0.68-0.89 в районе станции Аркона, свидетельствуя, что данные реанализа адекватно описывают основные особенности изменений солёности во время ББЗ. Сравнительно близкие значения у данных реанализа отмечаются и для оценок мат. ожидания ( $M$ ) изменений солёности на всех горизонтах станции Дарсс Силл и для верхних горизонтов (2 – 7 м) станции Аркона. Для более нижних горизонтов данные реанализа показывают завышенные значения  $M$  на 0.8 – 1.7‰.

Значения СКО у данных реанализа завышены на 15-27% относительно данных Дарсс Силл и в 1.3 – 2.0 раза относительно верхних горизонтов станции Аркона, в то время как для нижних горизонтов этой станции сравнение значений СКО показывает близкие значения (таблица 1). Сравнительно небольшие различия отмечаются для минимальных значений измеренной на станции Дарсс Силл и рассчитанной по реанализу солёности ( $S_{\min}$ ) в слое 7 – 20 м, однако в поверхностном слое по данным реанализа минимумы солёности меньше на 0.6 – 0.8 ‰. Для станции Аркона сравнение минимумов солёности с данными реанализа показывает близкие значения на всех горизонтах, кроме придонного, где отмечаются расхождения на 2,2‰. Наибольшие расхождения отмечаются для максимумов солёности ( $S_{\max}$ ): по сравнению с измеренными значениями на обеих станциях, по данным реанализа они завышены на 1.3 – 3 ‰ (см. табл. 1).

Выявленные различия модельных и измеренных оценок солёности могут быть связаны с недостаточно высоким пространственным разрешением сеточной области модели NEMO 3,6, не позволяющим правильно описывать изменчивость океанологических процессов в очень узких Датских проливах. Кроме того, измерения

океанологических параметров на станциях Дарсс Силл и Аркона являются точечными, а данные реанализа BSPAF воспроизводят поля гидрофизических характеристик с пространственным осреднением 2 x 2 мили.

### *3.2. Особенности изменчивости уровня моря в период формирования ББЗ*

На рис. 3 показаны среднесуточные значения уровня моря на станциях Хорнбаек и Гедсер в ноябре - декабре 2014 гг., а также разности между значениями уровня на этих же станциях. Хорошо видно, что с 5 ноября по 1 декабря 2014 г. уровень моря на юго-западе Балтики (п. Гедсер) был почти всегда выше, чем уровень в пр. Каттегат (п. Хорнбаек). Это было связано с преобладанием ветра восточных и юго-восточных румбов, который, согласно инструментальным измерениям на станции Дарсс Силл, достигал значений 5 - 15 м/с (Mohrholz et al., 2015). Такой ветер, сначала, привел к нагону уровня на юго-западе Балтики и сгону на юге пр. Каттегат, а после того, как градиент уровня между ними вырос до 62 см, начался отток вод из Балтики в Каттегат, что привело к понижению уровня в Балтийском море (рис. 3а). В начале декабря метеорологические условия изменились: под действием глубоких циклонов, распространяющихся над Северной Атлантикой в регионе Северного моря, стали дуть сильные ветры юго-западных и западных румбов со скоростями до 18 м/с. Такая синоптическая ситуация продолжалась в течение трёх недель (Mohrholz et al., 2015). В результате, под действием западных ветров в Каттегате начался нагон уровня, а на юго-западе открытой Балтики, наоборот, уровень сначала понизился из-за сгона (рис. 3а). Это привело к тому, что перепад уровня между Каттегатом и юго-западной Балтикой достиг 100 см (рис. 3 б), вызвав очень сильный большой заток солёных североморских вод в Балтийское море, который, по оценкам (Mohrholz et al., 2015), был третьим по величине в ряду ББЗ, начиная с 1880 г.

### *3.3. Особенности изменчивости течений и стратификации в Датских проливах во время ББЗ.*

Воды ББЗ распространяются в Балтику через очень узкие и мелководные Датские проливы: Зунд, Большой Бельт и Малый Бельт. По мнению Mattsson (Mattsson, 1996), пролив Малый Бельт не оказывает значительного влияния на водообмен Северного и Балтийского морей, так как его ширина в самом узком месте составляет всего 0,8 км, а минимальная глубина равна 12 м. Основной объём вод ББЗ поступает в Балтику через проливы Большой Бельт и Зунд. Минимальная ширина пролива Зунд составляет около 5

км, а наименьшая глубина - 8 м; для пр. Большой Бельт эти оценки составляют - 3,7 км и более 20 м. По оценкам Mattsson (Mattsson, 1996), объёмы транспорта вод во время ББЗ между Большим Бельтом и Зундом распределяются в соотношении 7:3. Однако Lintrup and Jakobsen (Lintrup and Jakobsen, 1999) пришли к выводу, что в отдельных случаях транспорт соли через пролив Зунд может превышать её транспорт через Большой Бельт.

Рис. 4 демонстрирует изменения во времени вертикальных распределений векторов скорости течений. Эти результаты, совместно с изменениями уровня моря (рис. 3), свидетельствуют, что период оттока балтийских вод начался в первых числах ноября 2014 г. и продолжался до 28 ноября, после чего начался предшествующий затоку период, когда синоптическая ситуация стала меняться, подули ветры западных румбов и уровень в Каттегате начал повышаться. Основной период ББЗ 2014 г. начался 3 декабря, когда отток вод из Балтики в Каттегат прекратился, и направления течений в проливах Зунд и Большой Бельт сменились на обратные на всех горизонтах. Такой однонаправленный поток каттегатских вод в Балтику продолжался до 23 декабря в Зунде (рис. 4а) и до 25 декабря в Большом Бельте (рис. 4 в). Затем, направления течений во всей толще сменились на обратные, демонстрируя, что начался период после затока, сопровождавшийся оттоком вод из Балтики в Каттегат (рис. 4а,в). Скорости течений в верхнем 10-ти метровом слое во время ББЗ имеют очень большие значения, достигающие 1.0 – 1.2 м/с. С глубиной скорости течений значительно уменьшаются до 0.1 – 0.3 м/с (рис. 4а, в).

Оценки бароклиной компоненты свидетельствуют, что в изменениях вертикальных профилей течений во время ББЗ преобладает первая бароклиная мода, узел которой в пр. Зунд располагается на глубинах 7 – 8 м, а в пр. Большой Бельт на глубинах 9-11 м (рис. 4 б,г). Скорости бароклиных течений достигают 0.2 – 0.6 м/с, свидетельствуя, что они вносят значительный вклад в суммарный перенос каттегатских вод через проливы во время ББЗ. Под влиянием бароклиной компоненты происходит значительное усиление наблюдающихся поверхностных течений и ослабление глубинных (рис. 4а,в).

Рис. 4 (б,г) демонстрирует также, что за ноябрь-декабрь 2014 г. вертикальная бароклиная структура течений квазипериодически меняется на обратную несколько раз. Это может свидетельствовать о влиянии низкочастотного волнового процесса на движения вод в системе Каттегат-Датские проливы-юго-западная Балтика. В работах (Захарчук et al., 2014; Тихонова and Сухачев, 2017) было показано, что ББЗ связаны с динамикой бароклиных топографических волн Россби. Это, преимущественно,

горизонтально-поперечные волны. В первой бароклинной моде у таких волн орбитальные движения частиц в поверхностном и придонном слоях направлены в противоположную сторону, относительно узла, расположенного в слое пикноклина (Тареев, 1974).

На рис. 5 представлены изменения во времени плотности воды в центральных частях проливов Зунд и Большой Бельт в ноябре – декабре 2014 г. Они свидетельствуют, что во время ББЗ стратификация в проливах Зунд и Большой Бельт сохраняется. Её наибольшее ослабление происходит в заключительной стадии ББЗ с 20 по 26 декабря 2014 г. (рис. 5).

#### *3.4. Влияние пространственных изменений плотности воды на уклоны уровня моря между Каттегатом и юго-западной Балтикой во время ББЗ.*

Волкер Мархольц идентифицировал ББЗ, рассчитанные по уклонам уровня между Каттегатом и юго-западной Балтикой, как баротропные затоки (Mohrholz, 2018). На наш взгляд, в этой работе недооценивается роль бароклинной компоненты в изменениях уровня моря в системе Каттегат-Датские проливы-юго-западная Балтика, где пространственные изменения солёности достигают 20-25‰ (Reissmann et al., 2009; Sellschopp et al., 2006).

Оценить разность уровня моря, обусловленную пространственными изменениями плотности воды в проливах Зунд и Большой Бельт во время ББЗ можно по формуле, предложенной в работе (Samuelsson and Stigebrandt, 1996).

$$\Delta h_b = -\rho_0^{-1} \int_0^{z_0} (\rho_1(z) - \rho_2(z)) dz + \frac{\Delta P_a}{g\rho_0} \quad (2)$$

где  $\Delta h_b$  – разность уровней моря за счет изменений плотности воды между Каттегатом ( $\rho_1$ ) и юго-западной Балтикой ( $\rho_2$ ),  $\rho_0$  – плотность воды;  $z$  – глубина моря  $\Delta P_a$  – разность атмосферного давления между Каттегатом и юго-западной Балтикой,  $z_0$  – горизонт, где отсутствует движение воды (за него принималась глубина моря),  $g$  – ускорение свободного падения.

Для оценки  $\Delta h_b$  по обоим сторонам проливов Зунд и Большой Бельт выбирались районы с одинаковыми глубинами (см. рис. 1). Значения плотности на разных горизонтах оценивались по температуре и солёности воды по уравнению состояния, описанному в работе (Jackett and McDougall, 1995). Значения атмосферного давления  $P_a$  брались из данных реанализа метеорологических полей ERA-5.

На рис. 6 сравниваются разности суммарного уровня моря по обеим сторонам проливов Зунд и Большой Бельт, оцененные по данным регионального реанализа BSPAF, и по формуле (1). Видно, что бароклинные уклоны уровня моря во время ББЗ направлены в противоположную сторону, относительно суммарных уклонов уровня моря. В проливе Зунд они достигают 25-40 см, что в 2.3 и 3.6 раза меньше максимальных суммарных уклонов уровня моря, которые равны 91 см (рис. 6а). В проливе Большой Бельт суммарные уклоны уровня моря изменяются от 10 до 61 см, а бароклинные уклоны уровня моря варьируют от 8 до 20 см (рис. 6б). В обоих случаях видно, что на отдельных временных отрезках ББЗ бароклинные уклоны уровня моря сравнимы с суммарными. Эти результаты свидетельствуют, что ББЗ 2014 года нельзя идентифицировать, как баротропный, так как в наблюдающиеся уклоны уровня моря в Датских проливах во время ББЗ заметный вклад вносит значительная пространственная неоднородность поля плотности, которая приводит к обратному уклону уровня моря, по сравнению с баротропным. Эти результаты не описывались ранее в публикациях, посвященных исследованию ББЗ.

### *3.5. Особенности изменчивости водообмена через Датские проливы в период формирования ББЗ.*

На рис. 7 представлены результаты сравнения оценок суммарного и бароклинного водообмена через проливы Зунд и Большой Бельт во время ББЗ 2014 года. Видно, что в период ББЗ в Зунде среднесуточный суммарный перенос каттегатских вод в Балтику меняется от 0.3 до 6.5 км<sup>3</sup>/сут, в то время как бароклинный перенос направлен, почти всегда, в противоположную сторону и составляет 0.2 – 1.8 км<sup>3</sup>/сут (рис. 7а). В проливе Большой Бельт суммарный перенос каттегатских вод в Балтику во время залива приблизительно в 2 раза больше, чем в Зунде, и составляет от 2 до 11.5 км<sup>3</sup>/сут, а интегральный по глубине бароклинный перенос меняется от 0 до 2.2 км<sup>3</sup>/сут (рис. 7б).

В таблице 2 показаны оценки водообмена между Каттегатом и юго-западной Балтикой за весь период ББЗ. Всего с 3 по 25 декабря 2014 г. в юго-западную Балтику прошло 243.7 км<sup>3</sup> каттегатских вод. Из них 88.6 км<sup>3</sup> прошло через Зунд, а 155.1 км<sup>3</sup> – через Большой Бельт. Бароклинный водообмен во время ББЗ в обоих проливах направлен из Балтики в Каттегат, и он был меньше суммарного переноса вод в 4.2 раза в Зунде, и в 5.5 раз в Большом Бельте (см. табл. 2).

Волкер Мархольц использовал два косвенных метода для оценки водообмена между Каттегатом и Балтикой во время ББЗ в декабре 2014 года (Mohrholz et al., 2015). Первый

метод оценивал водообмен в Датских проливах через изменения объёма воды в Балтийском море, вычисленные с помощью уравнения водного баланса. С помощью второго метода расходы воды в Датских проливах оценивались по уклонам уровня моря между Каттегатом и юго-западной Балтикой (Mohrholz et al., 2015). В качестве исходных данных для таких оценок использовались, как измерения уровня моря на мареографных станциях, так и результаты численного гидродинамического моделирования (Mohrholz et al., 2015).

Сравнение наших результатов оценок водообмена через Датские проливы во время ББЗ 2014 г. с оценками Морхольца, показало, что наши оценки суммарного водообмена через пр. Зунд выше на 14% - 28 % (см. табл.2), в то время, как рассчитанные нами значения общего водообмена через два пролива и, отдельно, через пр. Б. Бельт, входят в диапазон значений переноса вод во время ББЗ, полученных различными методами в работе (Mohrholz et al., 2015).

### *3.6. Особенности изменчивости придонной солёности на пространственных разрезах во время формирования и распространения ББЗ.*

На рис. 8 показаны изменения во времени придонной солёности на трёх разрезах в период с 01.11.2014 по 31.12.2015 г. На пространственно-временных диаграммах видно, что к середине декабря 2014 г., после прохождения проливов Зунд и Большой Бельт, солёные воды ББЗ поступают в Арконский бассейн (рис. 8 б,г,д), увеличивая придонную солёность в нём с 17‰ до 22-25‰ в течение двух месяцев до 15 февраля 2015 г. Параллельно с этим процессом наблюдается распространение вод ББЗ в Борнхольмский бассейн, в который они поступают около 25 декабря 2014 г., имея солёность 20 - 21‰ (рис. 8 б,г,д). Сравнение рис. 8б и 8е свидетельствует, что основной путь распространения вод ББЗ проходит севернее о-ва Борнхольм, где происходит большее увеличение солёности, чем к югу от него.

Результаты, представленные на рис. 8е, свидетельствуют, что в середине января 2015 года трансформированные воды ББЗ поступают в Гданьский залив, имея солёность у дна 13-15‰. Затем они распространяются на север и в начале апреля 2015 года приходят в Готландскую впадину (рис. 8 б,г,е). Поступление вод ББЗ в Готландскую впадину происходит в виде трёх прерывистых внедрений, периоды между которыми около 10 – 20 суток (рис. 8 б,г). Дальнейшее повышение солёности в придонном слое на разрезе I отмечается до точек 61, 62; на разрезе II - до 64-й точки, а на разрезе III – до 80-й точки. Эти результаты свидетельствуют, что трансформированные воды ББЗ не



поступали в Финский и Ботнический залив, а, по-видимому, распространились в западный Готландский бассейн. Подтверждением этому может служить наблюдающееся повышение придонной солёности в точках 73 – 80 на III разрезе (см. рис. 7 д,е) в октябре-декабре 2015 г.

### *3.7. Моделирование лагранжевых траекторий частиц воды при распространении ББЗ.*

На рис. 9 показаны, полученные с помощью лагранжева моделирования, траектории движения маркеров, которые размещались в ноябре-декабре 2014 г. на юге Каттегата. Можно видеть, что к концу января 2015 г. большая часть маркеров проходит Датские проливы, Арконский бассейн и заполняет Борнхольмский бассейн (рис. 9а), что хорошо согласуется с результатами, представленными на рис. 8. Также, значительная часть маркеров движется от места их размещения на север пр. Каттегат (рис. 9а). К концу июня 2015 г. маркеры активно распространяются по всему восточному Готландскому бассейну (рис. 9б). В октябре-декабре 2015 г. частицы проникают на север открытой Балтики, где часть из них, двигаясь по циклонической траектории, проникает в западный Готландский бассейн (Ландсортская впадина), а другая часть движется в сторону Финского залива, не достигая, однако, его к концу 2015 г. (рис. 9в и г). Это согласуется с результатами оценки распространения трансформированных вод ББЗ, полученной с помощью диаграмм временной изменчивости солёности на трёх разрезах (см. рис. 8). Спустя 15 месяцев после ББЗ часть маркеров достигает центральной части Финского залива (рис. 9д), а другая часть проходит с севера на юг весь западный Готландский бассейн (рис. 9д). Данные результаты хорошо согласуются с выводами работы (Liblik et al., 2018), в которой авторы, на основе анализа измерений температуры, солёности и кислорода на океанографических станциях, отмечают, что трансформированные воды ББЗ 2014 г. достигают Финского залива через 14–15 месяцев. Спустя два года после запуска маркеров, в Финском заливе и западном Готландском бассейне можно наблюдать ещё большее количество частиц (рис. 9е), при этом отдельные маркеры проникают в Рижский залив и, через Аландскую впадину, доходят до Ботнического залива (рис.9е).

## **4. Выводы**

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Мареографные измерения уровня моря на станциях Хорнбаек и Гедсер показали, что максимальный перепад уровня моря между Каттегатом и юго-западной Балтикой во время большого балтийского залива в декабре 2014 г. составил 100 см. Оценки разности уровня моря, обусловленной пространственными изменениями плотности воды в проливах Зунд и Большой Бельт во время ББЗ свидетельствуют, что бароклинные уклоны уровня моря во время ББЗ направлены в противоположную сторону, относительно суммарных уклонов уровня моря, а их величины в Датских проливах достигают 8 – 40 см, что всего в 1.5 – 3 раза меньше максимальных значений суммарных уклонов уровня моря. Эти результаты свидетельствуют, что хотя в ББЗ 2014 года преобладает баротропная составляющая, но в наблюдающиеся уклоны уровня моря в Датских проливах во время его распространения заметный вклад вносят уклоны, вызванные неоднородностью поля плотности морской воды.
2. Анализ вертикальных профилей векторов скорости течений в проливах Зунд и Большой Бельт свидетельствуют, что в период ББЗ в этих проливах на всех горизонтах отмечается однонаправленный поток вод из Каттегата в Балтику. Скорости течений на поверхности в проливах во время ББЗ достигают 1.0 – 1.2 м/с, уменьшаясь с глубиной до 0.1 – 0.3 м/с. Большие вертикальные градиенты скорости течений связаны с заметным влиянием бароклиновой компоненты в низкочастотных колебаниях течений, скорости которых достигают 0.2 – 0.6 м/с. Под влиянием бароклиновой компоненты в период ББЗ в Датских проливах происходит значительное усиление поверхностных течений и ослабление глубинных.
3. Изменения во времени плотности воды на разных горизонтах в проливах Зунд и Большой Бельт в ноябре – декабре 2014 г. свидетельствуют, что во время ББЗ устойчивая стратификация сохраняется. Её наибольшее ослабление происходит в заключительной стадии ББЗ с 20 по 26 декабря 2014 г.
4. Оценки водообмена между Каттегатом и юго-западной Балтикой за весь период ББЗ показывают, что всего с 3 по 25 декабря 2014 г. в юго-западную Балтику прошло 243.7 км<sup>3</sup> каттегатских вод: из них 88.6 км<sup>3</sup> прошло через Зунд, а 155.1 км<sup>3</sup> – через Большой Бельт. Показано, что бароклиновая компонента водообмена во время ББЗ в обоих проливах была направлена из Балтики в Каттегат, и она была меньше суммарного переноса вод в 4.2 раза в Зунде, и в 5.5 раз в Большом Бельте.
5. Изменения во времени придонной солёности на трёх разрезах в Балтийском море в период с 01.11.2014 по 31.12.2015 г. свидетельствуют, что трансформированные воды ББЗ, произошедшего в декабре 2014 г. достигли Готландской впадины в начале

апреля 2015 г. и, затем, продолжили распространяться на север открытой Балтики, где они повернули на юг и в декабре 2015 г. достигли западного Готландского бассейна.

- б. Анализ траекторий лагранжевых частиц показывает, что к февралю 2015 г. они заполняют Борнхольмский бассейн, а к июлю 2015 г. Готландскую впадину. С октября 2015 г. происходит активное проникновение маркеров в западный Готландский бассейн. Спустя 15 месяцев с момента запуска частицы обнаружены в Финском заливе, а через 2 года некоторые из них зафиксированы в Рижском заливе и на границе с Ботническим заливом.

## Литература

Budyansky, M. V., Udalov, A.A., Lebedeva, M.A., Belonenko, T. V. (2024). Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling. *Doklady Earth Sciences* 515, 458–467.

Dickson, R.R. (1973). The prediction of major Baltic inflows. *Dtsch. hydrogr.* 26, 97–105.

Feistel, R., Nausch, G., Heene, T., Piechura, J., Hagen, E. (2004). Evidence for a warm water inflow into the baltic proper in summer 2003. *Oceanologia* 46.

Fischer, H., Matthäus, W. (1996). The importance of the Drogden Sill in the Sound for major Baltic inflows. *Journal of Marine Systems* 9.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisfo, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.

Hordoir, R., Axell, L., Löptien, U., Dietze, H., Kuznetsov, I. (2015). Influence of sea level rise on the dynamics of salt inflows in the Baltic Sea. *J Geophys Res Oceans* 120.

Hordoir, R., Meier, H.E.M. (2010). Freshwater fluxes in the Baltic Sea: A model study. *J Geophys Res Oceans* 115.

Hughes, S.L., Holliday, N.P., Gaillard, F. (2012). Variability in the ICES/NAFO region between 1950 and 2009: Observations from the ICES Report on Ocean Climate. *ICES Journal of Marine Science*.

Jackett, D.R., McDougall, T.J. (1995). Minimal Adjustment of Hydrographic Profiles to Achieve Static Stability. *J Atmos Ocean Technol* 12.

Lehmann, A., Myrberg, K., Post, P., Chubarenko, I., Dailidienė, I., Hinrichsen, H.H., Hüseyin, K., Liblik, T., Meier, H.E.M., Lips, U., Bukanova, T. (2022). Salinity dynamics of the Baltic Sea. *Earth System Dynamics*.

Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009). *Physical Oceanography of the Baltic Sea*.

Liblik, T., Naumann, M., Alenius, P., Hansson, M., Lips, U., Nausch, G., Tuomi, L., Wesslander, K., Laanemets, J., Viktorsson, L. (2018). Propagation of impact of the recent Major Baltic Inflows from the Eastern Gotland basin to the Gulf of Finland. *Front Mar Sci* 5.

Lintrup, M.J., Jakobsen, F. (1999). The importance of Oresund and the Drogden sill for Baltic inflow. *Journal of Marine Systems* 18.

Liu, Y., Axell, L., Jandt, S., Lorkowski, I., Lindenthal, A., Verjovkina, S., Schwichtenberg, F. (2019). Quality information document. Baltic Sea Production Centre BALTICSEA\_REANALYSIS\_PHY\_003\_011. Copernicus., Marine Environment monitoring service.

Madsen, K.S., Højerslev, N.K. (2009). Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone. *Boreal Environment Research* 14, 125–131.

Markus Meier, H.E. (2007). Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea. *Estuar Coast Shelf Sci* 74.

Matthäus, W. (2006). *The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea - from the early beginning to recent results*, Meereswissenschaftliche Berichte.

Matthaus, W., Franck, H. (1989). Is the positive salinity anomaly in the Kattegat deep water a necessary precondition for major Baltic inflows? *Gerlands Beitr. Geophys* 9, 332–343.

Matthäus, W., Franck, H. (1992). Characteristics of major Baltic inflows: A statistical analysis. *Cont Shelf Res* 12, 1375–1400.

Mattsson, J. (1996). Some comments on the barotropic flow through the Danish Straits and the division of the flow between the Belt Sea and the Öresund. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 48.

Meier, H.E.M., Döscher, R., Broman, B., Piechura, J. (2004). The major baltic inflow in January 2003 and preconditioning by smaller inflows in summer / autumn 2002: A model study. *Oceanologia* 46.

- Mohrholz, V. (2018). Major Baltic inflow statistics - Revised. *Front Mar Sci* 5.
- Mohrholz, V., Naumann, M., Nausch, G., Krüger, S., Gräwe, U. (2015). Fresh oxygen for the Baltic Sea - An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. *Journal of Marine Systems* 148.
- Morozov, E.G., Frey, D.I., Salyuk, P.A., Budyansky, M.V. (2024). Amazon River Plume in the Western Tropical North Atlantic. *J. Mar. Sci. Eng.* 851.
- Nerger, L., Hiller, W., Schröter, J. (2005). A comparison of error subspace Kalman filters. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*.
- Pemberton, P., Löptien, U., Hordoir, R., Höglund, A., Schimanke, S., Axell, L., Haapala, J. (2017). Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: A NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea. *Geosci Model Dev* 10.
- Prants, S.V., Uleysky, M.Y., Budyansky, M.V. (2017). *Lagrangian oceanography: Large-scale transport and mixing in the ocean.*, Berlin, New York: Springer.
- Prants, S. V. (2015). Backward-in-time methods to simulate large-scale transport and mixing in the ocean. *Phys Scr* 90.
- Prants, S. V., Budyansky, M. V., Uleysky, M.Y., Kulik, V. V. (2021). Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004–2019. *Journal of Marine Systems* 222.
- Quante, M., Colijn, F., Bakker, J.P., Härdtle, W., Heinrich, H., Lefebvre, C., Nöhren, I., Olesen, J.E., Pohlmann, T., Sterr, H., Sündermann, J., Tölle, M.H. (2016). *North Sea Region Climate Change Assessment*.
- Reissmann, J.H., Burchard, H., Feistel, R., Hagen, E., Lass, H.U., Mohrholz, V., Nausch, G., Umlauf, L., Wiczorek, G. (2009). Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication - A review. *Prog Oceanogr*.
- Samuelsson, M., Stigebrandt, A. (1996). Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 48.
- Sellschopp, J., Arneborg, L., Knoll, M., Fiekas, V., Gerdes, F., Burchard, H., Ulrich Lass, H., Mohrholz, V., Umlauf, L. (2006). Direct observations of a medium-intensity inflow into the Baltic Sea. *Cont Shelf Res* 26.
- Wyrтки, K. (1953). Die Dynamik der Wasserbewegungen in Fehmarnbelt. *Kieler Meeresforschungen* IX, 155–170.
- Антонов, А.Е. (1978). Современные тенденции изменений гидролого-гидрохимических условий Балтийского моря. *Труды ГОИН* 147.

Захарчук, Е.А., Литина, Е.Н., Клеванцов, Ю.П., Сухачёв, В.Н., Тихонова, Н.А. (2017а). Нестационарность гидрометеорологических процессов Балтийского моря в условиях меняющегося климата. *Труды ГОИИ* 218, 6–62.

Захарчук, Е.А., Литина, Е.Н., Сухачев, В.Н., Тихонова, Н.А. (2023). Стерические колебания уровня Балтийского моря. *Russian Journal of Earth Sciences* 23.

Захарчук, Е.А., Сухачев, В.Н., Тихонова, Н.А. (2014). О влиянии межгодовой изменчивости характеристик атмосферных циклонов на частоту опасных подъёмов уровня моря на востоке Финского залива. *Проблемы Арктики и Антарктики* 3 (101), 27–36.

Захарчук, Е.А., Сухачев, В.Н., Тихонова, Н.А. (2017б). *Механизмы опасных подъёмов уровня моря в Финском заливе.*, Санкт-Петербург: Петербург-XXI Век.

Иванова, Т.А. (1989). *Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Выпуск 4. Основные тенденции эволюции экосистемы.*, Ленинград: Гидрометеиздат

Литина, Е.Н., Захарчук, Е.А., Тихонова, Н.А. (2020). Динамика гипоксийных зон в Балтийском море на рубеже XX и XXI веков. *Водные ресурсы* 47, 322–329.

Первунина, Т.П., Жукова, К.В., Лундберг, О.Р. (1955). Из опыта гармонического анализа суточных наблюдений над течениями. *Тр. Гоин* 30, 226–241.

Тареев, Б.А., (1974). *Динамика бароклинных возмущений в океане.* Москва: МГУ,

Терзиев, Ф.С., Рожков, В.А., Смирнова, А.И. (1992). *Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I Гидрометеорологические условия.*, Санкт-Петербург: Гидрометеиздат

Тихонова, Н.А., Сухачев, В.Н. (2017). Волновая интерпретация больших Балтийских затоков. *Метеорология и гидрология* 4, 67–69.

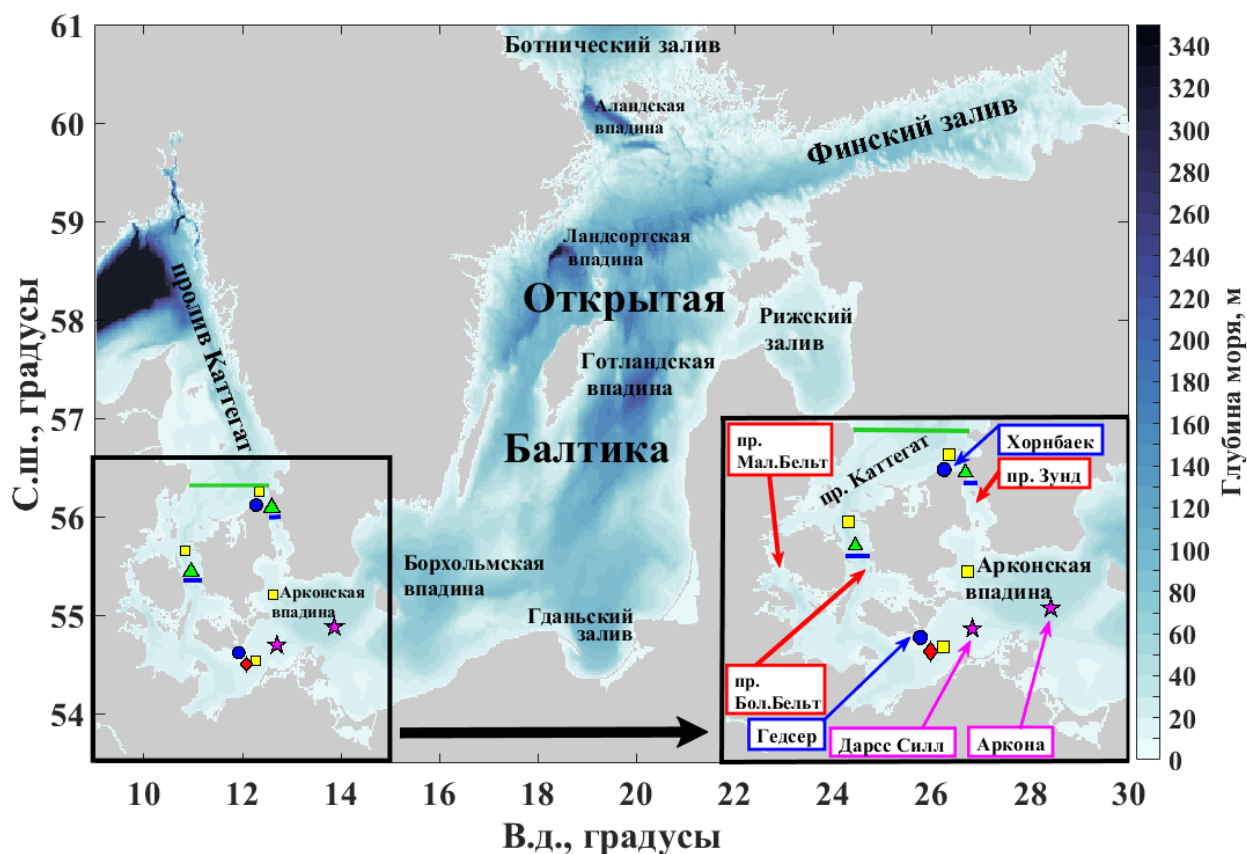


Рис. 1. Батиметрия Балтийского моря, местоположение станций мареографных измерений уровня моря Хорнбаек и Гедсер, Аркона. Зелёные треугольники – районы в проливах Большой Бельт и Зунд, где оценивалось изменение во времени вертикальных профилей солёности и течений во время формирования ББЗ. Красный ромб - плавмаяк Гедсер Рев (GR). Синие линии – сечения, на которых оценивался водообмен между Каттегатом и Балтикой. Желтые квадраты – районы, между которыми оценивались уклоны уровня моря по данным регионального реанализа BSPAF. Зеленая линия – линия размещения пассивных маркеров. Данные батиметрии взяты из The Baltic Sea Bathymetry Database (Baltic Sea Hydrographic Commission, 2013)

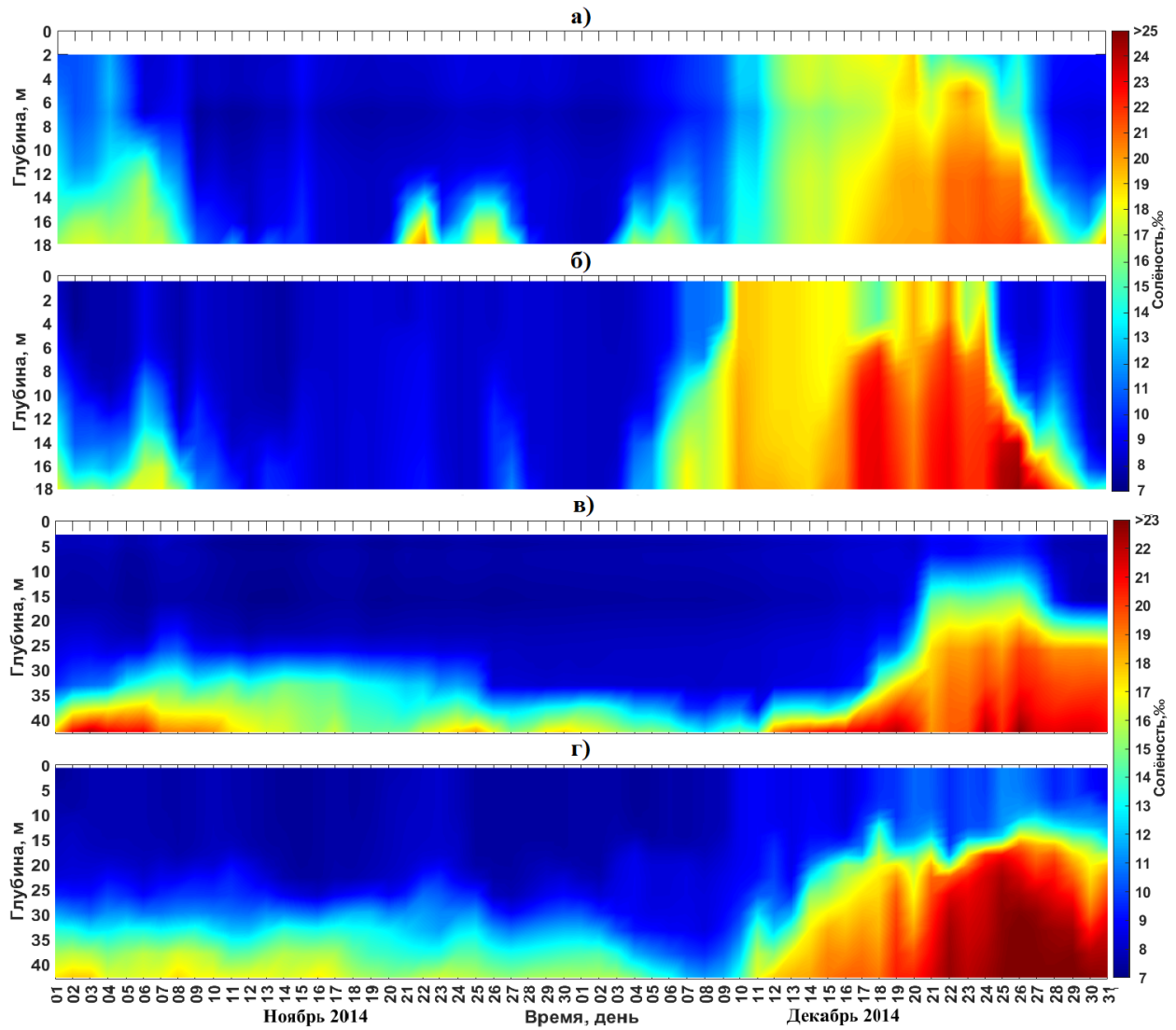


Рис. 2. Сравнение временного хода вертикальных профилей солёности на станциях Дарсс Силл (а) и Аркона (в) с данными регионального реанализа BSPAF (б, г) за 1 ноября – 31 декабря 2014 г.

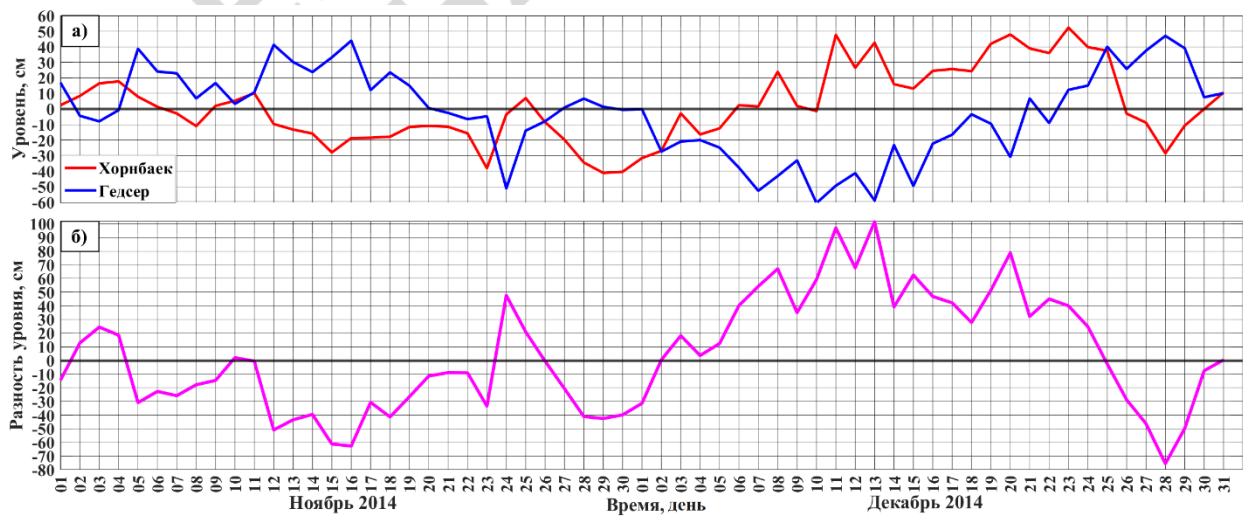




Рис. 3. Среднесуточные значения уровня моря на станциях Хорнбаек и Гедсер (см. рис. 1) в ноябре- декабре 2014 г. (а), и разности между значениями уровня в пунктах Хорнбаек и Гедсер за этот же период (б). Положительные разности на рис. 3б показывают, что уровень моря в Каттегате (Хорнбаек) выше, чем на юго-западе Балтики (Гедсер).

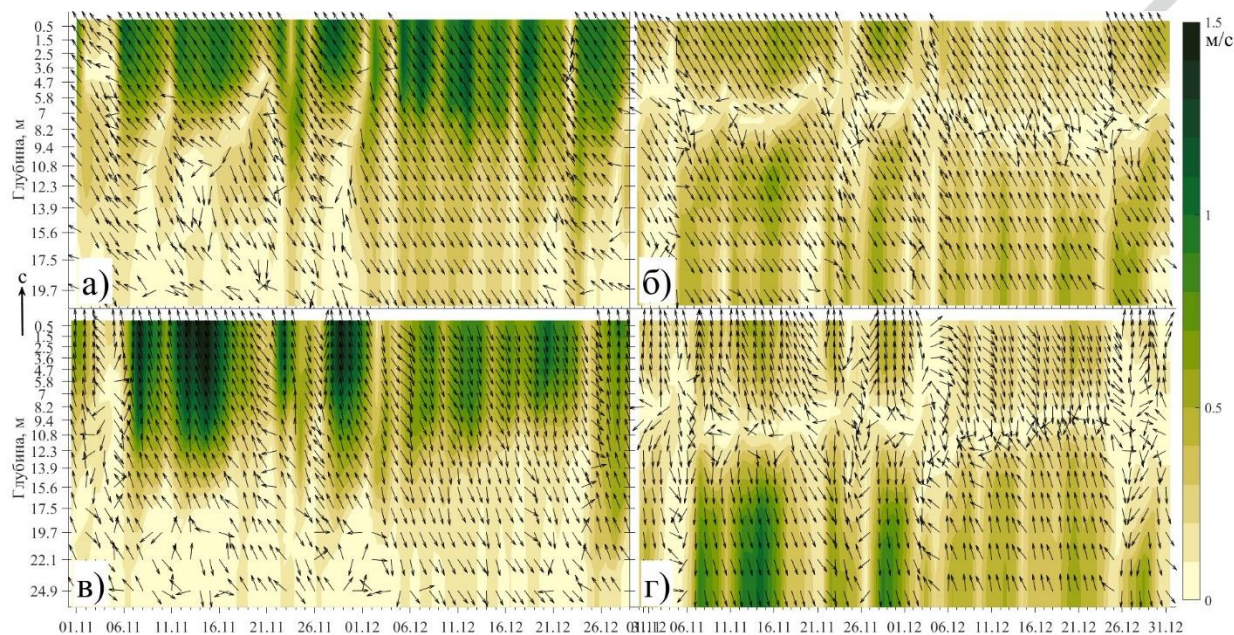


Рис. 4. Изменения во времени вертикальных профилей среднесуточных векторов скорости суммарных течений (а,в) и их бароклинной компоненты (б,г) в проливах Зунд (а, б) и Большой Бельт (в,г) с 01.11. по 31.12.2014 г.

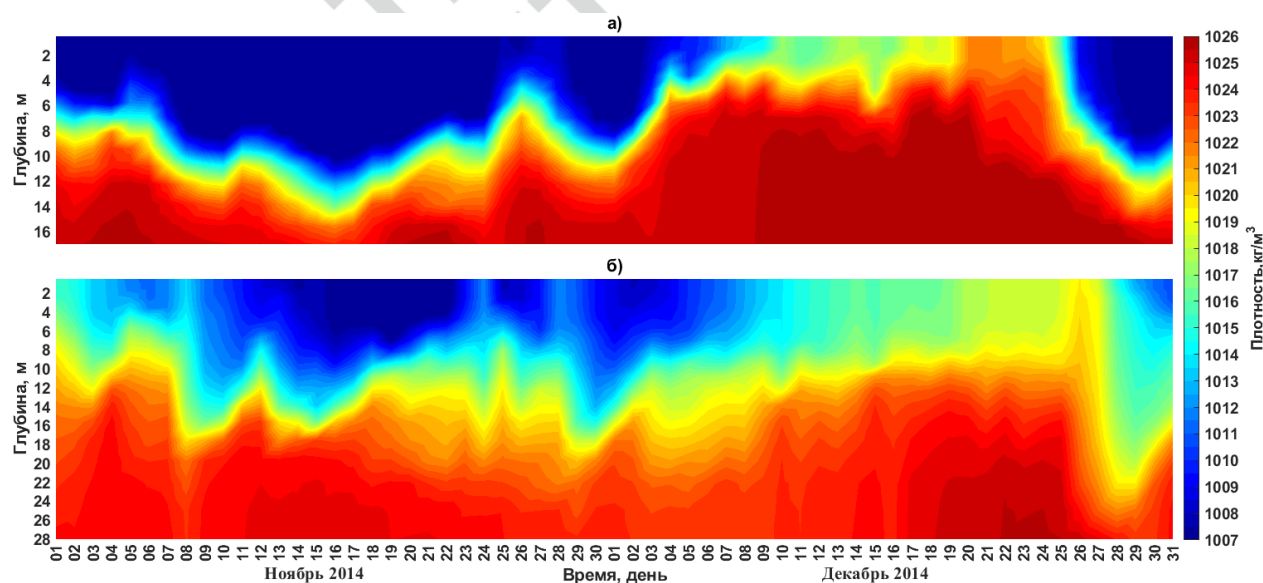


Рис. 5. Изменение во времени плотности воды в центральных частях проливов Зунд (а) и Большой Бельт в ноябре – декабре 2014 г.

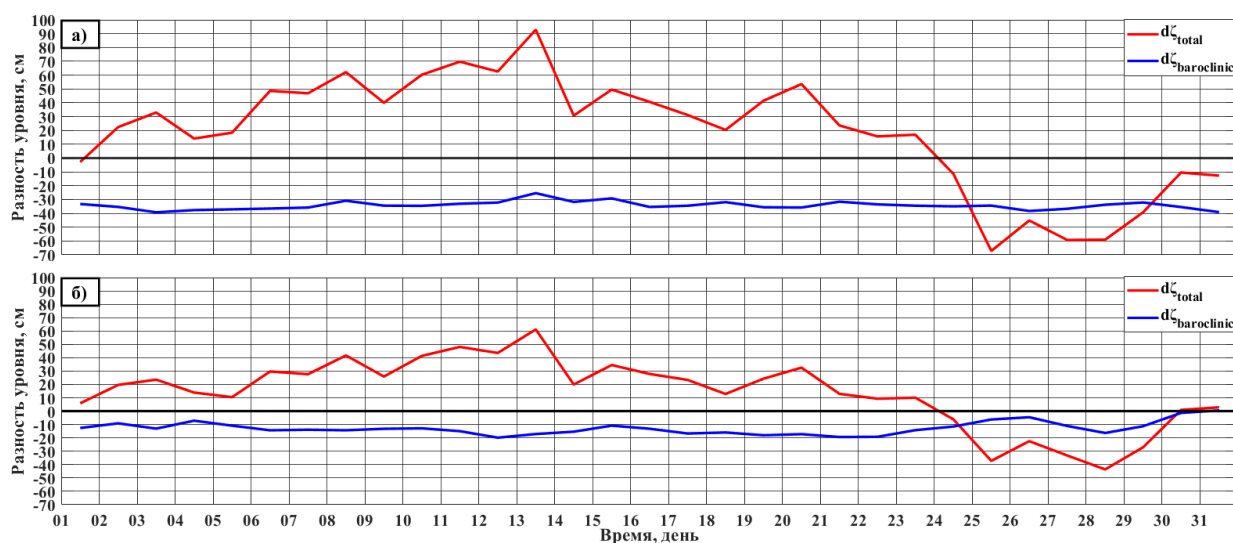


Рис. 6. Изменение разности суммарных уровней моря на входе и выходе из проливов Зунд (а) и Большой Бельт (б), оцененные по данным регионального реанализа (красная линия), и рассчитанные по формуле (3) разности уровней моря в этих проливах, обусловленные изменениями плотности воды.

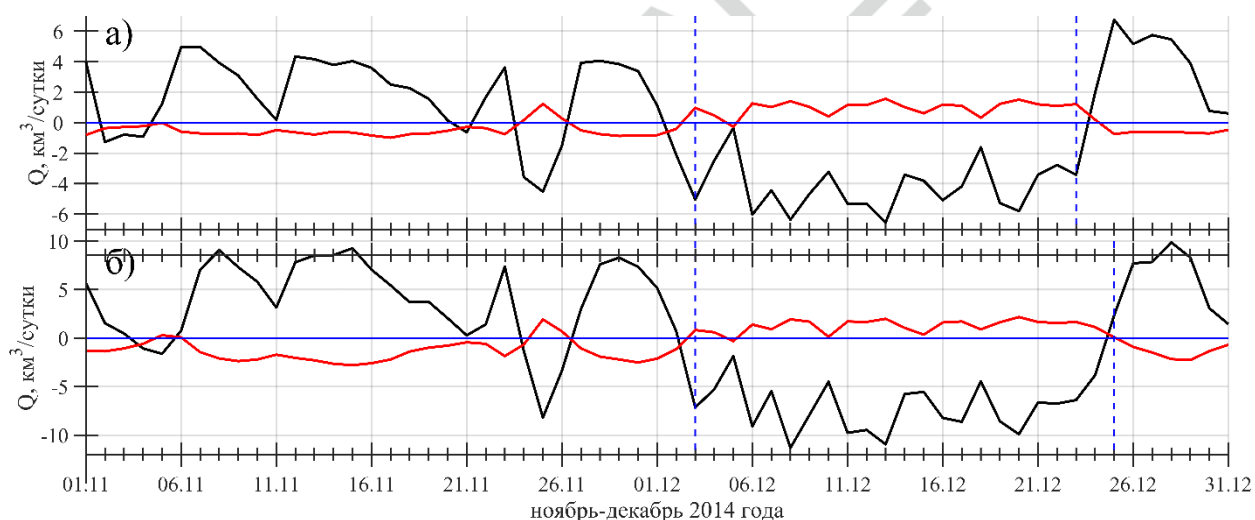


Рис. 7. Среднесуточные значения суммарного (черная линия) и бароклинного (красная линия) водообмена через проливы Зунд (а) и Большой Бельт (б) в ноябре-декабре 2014 г. Синим пунктиром обозначен период ББЗ. При отрицательных значениях водообмен направлен из Каттегата в Балтику, а при положительных – в Каттегат.

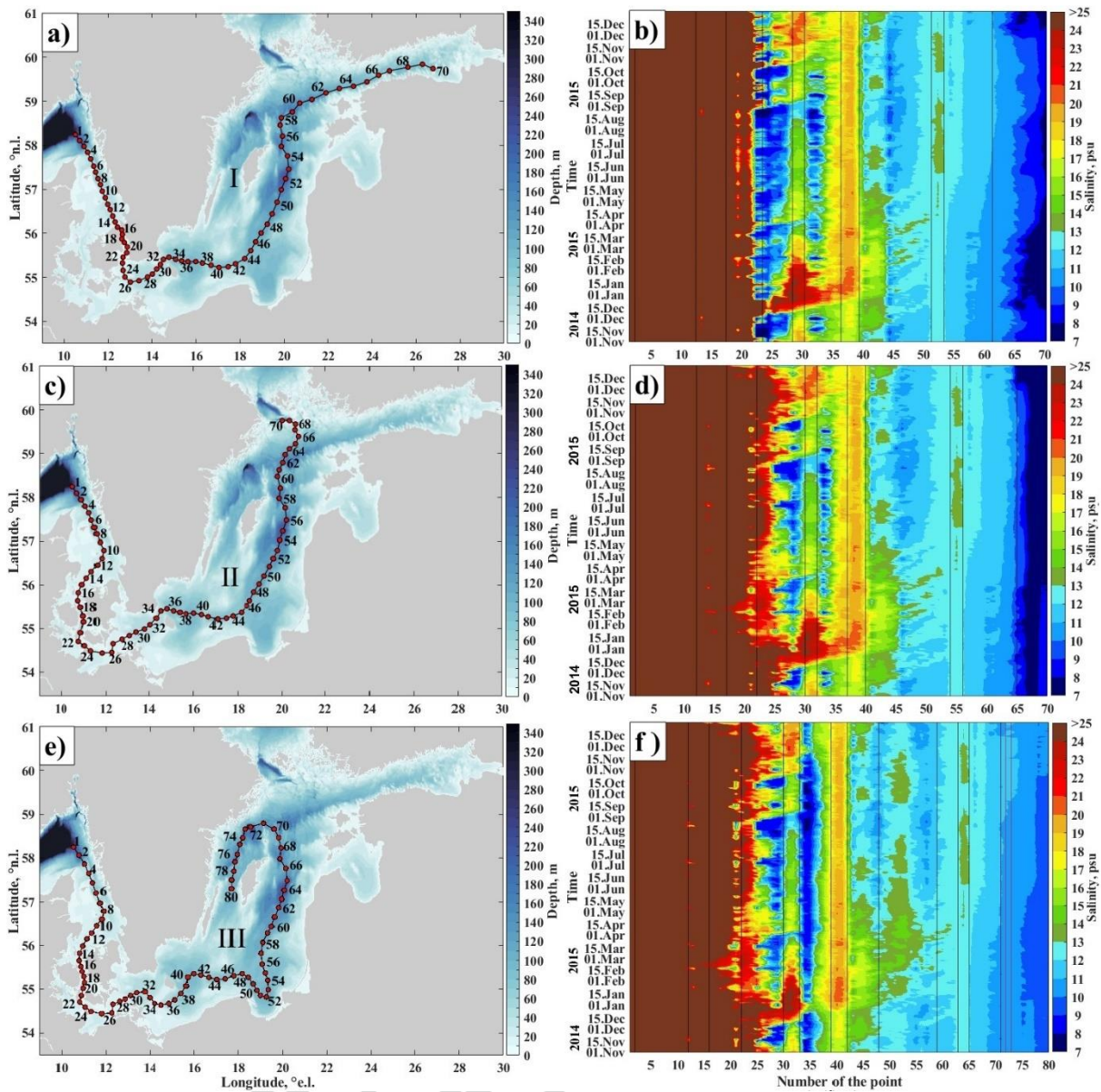


Рис.8. Разрезы I, II, III (а, в, д) и диаграммы временной изменчивости придонной солёности (б, г, е) на разрезах I, II, III за период с 01.11.2014 по 31.12.2015.

АССЕР  
ПРИМ

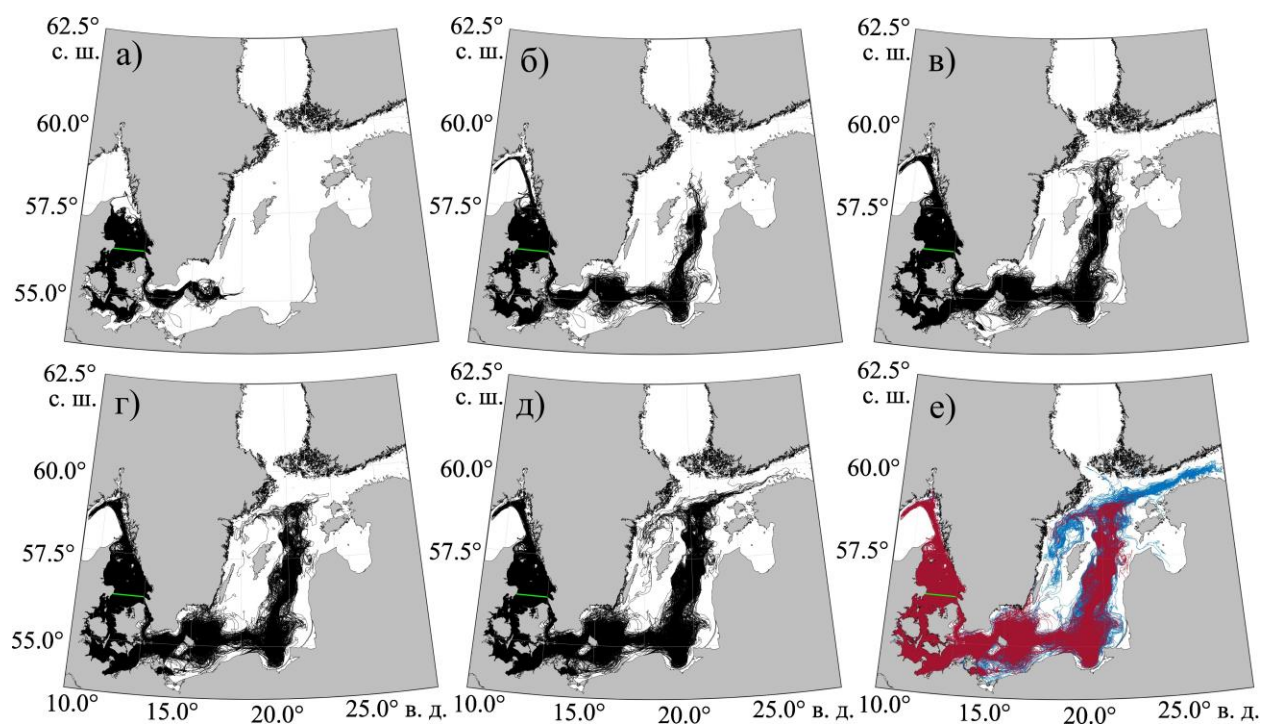


Рис. 9. Фрагменты траекторий лагранжевых частиц с момента запуска по: а) 31 января; б) 30 июня; в) 31 октября; г) 31 декабря 2015 г.; д) 31 марта 2016; е) 31 декабря 2015 г. (красный цвет) и 31 декабря 2016 г. (синий цвет). Зеленой линией отмечено место запуска маркеров.

**Таблица 1.** Статистические характеристики изменений солёности на разных горизонтах станций Дарсс Силл (ДС) и Аркона (АР) и по данным регионального реанализа BSPAF (PP): М – мат. ожидание, СКО – ср. кв. отклонение,  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$ , минимальное и максимальное значения, R – коэффициент взаимной корреляции.

Горизонт, м		М, ‰		СКО, ‰		$S_{\max}$ , ‰		$S_{\min}$ , ‰		R
ДС	PP	ДС	PP	ДС	PP	ДС	PP	ДС	PP	ДС x PP
2	1,5	10,93	10,89	3,37	4,31	19,21	20,53	8,07	7,31	0,87
5	4,7	11,22	11,07	3,81	4,49	20,15	21,60	8,07	7,43	0,89
7	7,0	10,86	11,60	3,85	5,00	19,45	22,41	7,47	7,67	0,88
12	12,3	12,28	12,99	4,42	5,34	21,26	23,01	8,05	7,92	0,90
15	17,5	14,44	14,87	4,47	5,52	21,57	24,75	8,13	8,11	0,79
19	19,7	15,80	15,66	4,32	5,89	21,93	24,92	8,21	8,11	0,71
АР	PP	АР	PP	АР	PP	АР	PP	АР	PP	АР x PP
2	1,5	8,16	8,28	0,52	1,04	9,71	11,08	7,58	7,25	0,86
5	4,7	7,75	8,29	0,51	1,05	9,33	11,10	7,14	7,32	0,81
7	6,9	7,93	8,33	0,54	1,10	9,69	11,15	7,36	7,32	0,84
16	15,6	8,39	9,45	2,34	3,04	15,59	18,82	7,14	7,32	0,68
25	24,9	10,15	11,83	4,08	5,01	19,87	22,51	7,65	7,47	0,89
33	31,9	12,57	14,11	4,27	4,46	20,64	23,13	7,99	8,42	0,79
40	41,1	16,56	17,33	3,15	3,10	21,98	23,28	9,09	11,29	0,83

**Таблица 2.** Оценки суммарного и бароклинного водообмена в км<sup>3</sup> за период ББЗ 03.12 – 25.12.2014 г. в проливах Зунд и Большой Бельт. Отрицательные значения – водообмен направлен в Балтику, положительные – из Балтики.

Проливы	Суммарный, км <sup>3</sup>	Бароклинный, км <sup>3</sup>	Суммарный, км <sup>3</sup> (Mohrholz, 2015)
Зунд	-88.6	20.7	-64 ÷ -76
Большой Бельт	-155.1	28.1	-138 ÷ -248*
Зунд + Б. Бельт	-243.7	48.9	-198 ÷ -323*

\*Оценки включали значения водообмена и через пролив Малый Бельт

**Peculiarities of variability of the thermohaline structure and dynamics of the Baltic Sea waters during the appearance and distribution of the Major Baltic Inflow in December 2014<sup>2</sup>**

*Zakharchuk Evgenii Aleksandrovich<sup>1,2</sup>, Vinogradov Mikhail Vladimirovich<sup>1,2</sup>, Sukhachev Vladimir Nikolaevich<sup>1,2</sup>, Tikhonova Natalia Aleksandrovna<sup>1,2</sup>, Travkin Vladimir Stanislavovich<sup>1,2</sup>, Uleysky Mikhail Iurevich<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Saint-Petersburg University, 13B Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russia

<sup>2</sup> N.N.Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, 6, Kropotkinskiy Lane, 119034, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science,  
43, Baltiyskaya Street, 690041, Vladivostok, Russia

Zakharchuk E.A., eazakharchuk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6079-5739>

Vinogradov M.V., vinogradovm2000@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-3744-8204>

Sukhachev V.N., syhachev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4821-4342>

Tikhonova N.A., nata-tik@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4546-4920>

Travkin V.S., vtravkin99@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7254-9313>

Uleysky M.Yu. (uleysky@poi.dvo.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6499-1470>)

Corresponding author:

Sukhachev Vladimir Nikolaevich

Phone: +79213978864

Email: Syhachev@mail.ru

Address: Beringa st. 38, Saint-Petersburg, Russia, 199397

**Annotation**

Based on the data of the Baltic Sea Physics Analysis and Forecast (BSPAF) regional reanalysis of hydrophysical fields and instrumental measurements of sea level and salinity, the

---

<sup>2</sup> The study was effectuated thanks to the Russian Science Foundation 24-27-00412 Grant « Clarification of the mechanisms of generation and nonstationarity of large Baltic backflows ».

peculiarities of the variability of oceanographic processes in the Baltic Sea during the spread of the Major Baltic Inflow (MBI) of saline North Sea waters, which occurred in December 2014, are investigated. The maximum sea level difference between the Kattegat and the southwestern Baltic during the Major Baltic Inflow in December 2014 is investigated. It is shown that the 2014 MBI cannot be identified as barotropic, since slopes caused by the heterogeneity of the seawater density field make a significant contribution to the observed sea-level slopes in the Danish Straits during the MBI. Vertical profiles of water density and currents during the MBI demonstrate the preservation of stratification in the Danish Straits and the presence of a unidirectional flow directed from the Kattegat to the Baltic, with velocities at the surface of 1.0-1.2 m/s and at the bottom of 0.10-0.30 m/s. Significant vertical gradients of the flow velocity are due to the influence of the baroclinic component, the velocities of which reach 0.2 – 0.6 m/s. that 243.7 km<sup>3</sup> of Kattegat waters passed into the southwestern Baltic during the entire period of the BBZ, which is consistent with earlier calculations made using other methods. Analysis of changes in the time of near-bottom salinity at three sections in the Baltic Sea shows that the transformed waters of the MBI reached the Gotland Basin in early April 2015 and then continued to spread to the north of the open Baltic, where they turned south and reached the western Gotland basin in December 2015.

**Keywords:** Baltic Sea, Danish Straits, Major Baltic Inflow, regional reanalysis of hydrophysical fields, water exchange, currents, water salinity, sea level, stratification.

## References

Antonov, A.E. (1978). Current trends in changes in hydrological and hydrochemical conditions of the Baltic Sea. *Trudy of GOIN* 147. (In Russian)

Budyansky, M. V., Udalov, A.A., Lebedeva, M.A., Belonenko, T. V. (2024). Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling. *Doklady Earth Sciences* 515, 458–467.

Dickson, R.R. (1973). The prediction of major Baltic inflows. *Dtsch. hydrogr.* 26, 97–105.

Feistel, R., Nausch, G., Heene, T., Piechura, J., Hagen, E. (2004). Evidence for a warm water inflow into the baltic proper in summer 2003. *Oceanologia* 46.

Fischer, H., Matthäus, W. (1996). The importance of the Drogden Sill in the Sound for major Baltic inflows. *Journal of Marine Systems* 9.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisfo, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.

Hordoir, R., Axell, L., Löptien, U., Dietze, H., Kuznetsov, I. (2015). Influence of sea level rise on the dynamics of salt inflows in the Baltic Sea. *J Geophys Res Oceans* 120.

Hordoir, R., Meier, H.E.M. (2010). Freshwater fluxes in the Baltic Sea: A model study. *J Geophys Res Oceans* 115.

Hughes, S.L., Holliday, N.P., Gaillard, F. (2012). Variability in the ICES/NAFO region between 1950 and 2009: Observations from the ICES Report on Ocean Climate. *ICES Journal of Marine Science*.

Ivanova, T.A. (1989). *Problems of research and mathematical modeling of the ecosystem of the Baltic Sea. Issue 4. The main trends in the evolution of the ecosystem.*, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)

Jackett, D.R., McDougall, T.J. (1995). Minimal Adjustment of Hydrographic Profiles to Achieve Static Stability. *J Atmos Ocean Technol* 12.

Lehmann, A., Myrberg, K., Post, P., Chubarenko, I., Dailidienė, I., Hinrichsen, H.H., Hüseyin, K., Liblik, T., Meier, H.E.M., Lips, U., Bukanova, T. (2022). Salinity dynamics of the Baltic Sea. *Earth System Dynamics*.

Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009). *Physical Oceanography of the Baltic Sea*.

Liblik, T., Naumann, M., Alenius, P., Hansson, M., Lips, U., Nausch, G., Tuomi, L., Wesslander, K., Laanemets, J., Viktorsson, L. (2018). Propagation of impact of the recent Major Baltic Inflows from the Eastern Gotland basin to the Gulf of Finland. *Front Mar Sci* 5.

Lintrup, M.J., Jakobsen, F. (1999). The importance of Oresund and the Drogden sill for Baltic inflow. *Journal of Marine Systems* 18.

Litina, E.N., Zakharchuk, E.A., Tikhonova, N.A. (2020). Dynamics of hypoxic zones in the Baltic Sea at the turn of the XX and XXI centuries. *Water Resources* 47, 322–329. (In Russian)



Liu, Y., Axell, L., Jandt, S., Lorkowski, I., Lindenthal, A., Verjovkina, S., Schwichtenberg, F. (2019). Quality information document. Baltic Sea Production Centre BALTICSEA\_REANALYSIS\_PHY\_003\_011. Copernicus., Marine Environment monitoring service.

Madsen, K.S., Højerslev, N.K. (2009). Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone. *Boreal Environment Research* 14, 125–131.

Markus Meier, H.E. (2007). Modeling the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea. *Estuar Coast Shelf Sci* 74.

Matthäus, W. (2006). *The history of investigation of salt water inflows into the Baltic Sea - from the early beginning to recent results*, Meereswissenschaftliche Berichte.

Matthaus, W., Franck, H. (1989). Is the positive salinity anomaly in the Kattegat deep water a necessary precondition for major Baltic inflows? *Gerlands Beitr. Geophys* 9, 332–343.

Matthäus, W., Franck, H. (1992). Characteristics of major Baltic inflows: A statistical analysis. *Cont Shelf Res* 12, 1375–1400.

Mattsson, J. (1996). Some comments on the barotropic flow through the Danish Straits and the division of the flow between the Belt Sea and the Öresund. Tellus, Series A: Dynamic *Meteorology and Oceanography* 48.

Meier, H.E.M., Döscher, R., Broman, B., Piechura, J. (2004). The major baltic inflow in January 2003 and preconditioning by smaller inflows in summer / autumn 2002: A model study. *Oceanologia* 46.

Mohrholz, V. (2018). Major Baltic inflow statistics - Revised. *Front Mar Sci* 5.

Mohrholz, V., Naumann, M., Nausch, G., Krüger, S., Gräwe, U. (2015). Fresh oxygen for the Baltic Sea - An exceptional saline inflow after a decade of stagnation. *Journal of Marine Systems* 148.

Morozov, E.G., Frey, D.I., Salyuk, P.A., Budyansky, M.V. (2024). Amazon River Plume in the Western Tropical North Atlantic. *J. Mar. Sci. Eng.* 851.

Nerger, L., Hiller, W., Schröter, J. (2005). A comparison of error subspace Kalman filters. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*.

Pemberton, P., Löptien, U., Hordoir, R., Höglund, A., Schimanke, S., Axell, L., Haapala, J., (2017). Sea-ice evaluation of NEMO-Nordic 1.0: A NEMO-LIM3.6-based ocean-sea-ice model setup for the North Sea and Baltic Sea. *Geosci Model Dev* 10.

Pervunina, T.P., Zhukova, K.V., Lundberg, O.R. (1955). From the Experience of Harmonic Analysis of Daily Observations of Currents. *Tr. Goin* 30, 226–241. (In Russian)

Prants, S. V. (2015). Backward-in-time methods to simulate large-scale transport and mixing in the ocean. *Phys Scr* 90.

Prants, S. V., Budyansky, M. V., Uleysky, M.Y., Kulik, V. V. (2021). Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004–2019. *Journal of Marine Systems* 222.

Prants, S.V., Uleysky, M.Y., Budyansky, M.V. (2017). *Lagrangian oceanography: Large-scale transport and mixing in the ocean*. Berlin, New York: Springer.

Quante, M., Colijn, F., Bakker, J.P., Härdtle, W., Heinrich, H., Lefebvre, C., Nöhren, I., Olesen, J.E., Pohlmann, T., Sterr, H., Sündermann, J., Tölle, M.H. (2016). *North Sea Region Climate Change Assessment*.

Reissmann, J.H., Burchard, H., Feistel, R., Hagen, E., Lass, H.U., Mohrholz, V., Nausch, G., Umlauf, L., Wieczorek, G. (2009). Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication - A review. *Prog Oceanogr*.

Samuelsson, M., Stigebrandt, A. (1996). Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 48.

Sellschopp, J., Arneborg, L., Knoll, M., Fiekas, V., Gerdes, F., Burchard, H., Ulrich Lass, H., Mohrholz, V., Umlauf, L. (2006). Direct observations of a medium-intensity inflow into the Baltic Sea. *Cont Shelf Res* 26.

Tareev, B.A. (1974). *Dynamics of baroque disturbances in the ocean*. Moscow: Moscow State University Publ. (In Russian)

Terziev, F.S., Rozhkov, V.A., Smirnova, A.I. (1992). *The project "Seas of the USSR". Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Volume III The Baltic Sea. Issue I Hydrometeorological conditions*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., (In Russian)

Tikhonova, N.A., Sukhachev, V.N. (2017). Wave interpretation of the Great Baltic Backwaters. *Meteorology and Hydrology* 4, 67–69. (In Russian)

Wyrтки, K. (1953). Die Dynamik der Wasserbewegungen in Fehmarnbelt. *Kieler Meeresforschungen* IX, 155–170.

Zakharchuk, E.A., Litina, E.N., Klevantsov, Yu.P., Sukhachev, V.N., Tikhonova, N.A. (2017a). Nonstationarity of hydrometeorological processes in the Baltic Sea under changing climate conditions. *Trudy GOIN* 218, 6–62. (In Russian)

Zakharchuk, E.A., Litina, E.N., Sukhachev, V.N., Tikhonova, N.A. (2023). Steric fluctuations in the level of the Baltic Sea. *Russian Journal of Earth Sciences* 23. (In Russian)

Zakharchuk, E.A., Sukhachev, V.N., Tikhonova, N.A. (2017b). *Mechanisms of dangerous sea level rises in the Gulf of Finland*. St. Petersburg: St. Petersburg-XXI century Publ. (In Russian)

Zakharchuk, E.A., Sukhachev, V.N., Tikhonova, N.A., (2014). On the influence of interannual variability of atmospheric cyclone characteristics on the frequency of dangerous sea level rises in the east of the Gulf of Finland. *Problems of the Arctic and Antarctic* 3 (101), 27–36. (In Russian)

АССЕРТЕД MANUSCRIPT  
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ