

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 493—511.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 493—511.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [551.468:574.5]:[504.61+551.583](261.243)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511

Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря

***Екатерина Васильевна Волощук¹, Татьяна Рэмовна Ерёмина¹,
Евгения Кирилловна Ланге², Александр Сергеевич Аверкиев¹***

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Аннотация. В работе исследуется изменчивость гидрометеорологических характеристик и компонентов экосистемы восточной части Финского залива в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки. Выявлены положительные тренды изменчивости температуры воздуха в регионе за период 1991—2020 гг. Наряду с этим по данным наблюдений 1978—2016 гг. отмечается тенденция роста концентрации фосфатов и ухудшение кислородных условий в придонном слое, а термогалинный режим по-прежнему является одним из главных факторов, определяющих структурно-функциональные характеристики фитопланктона в восточной части Финского залива.

Ключевые слова: Финский залив, климат, гидрометеорологические характеристики, изменчивость экосистемы.

Благодарности: Работа выполнена в РГГМУ в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU—2023—0002. Статистический анализ данных по фитопланктону выполнен Е. К. Ланге в рамках госзадания ИО РАН №FMWE—2021—0007.

Для цитирования: Волощук Е. В., Ерёмина Т. Р., Ланге Е. К., Аверкиев А. С. Влияние климатических изменений и антропогенной деятельности на гидрометеорологический режим и состояние экосистемы Финского залива Балтийского моря // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 493—511. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511.

Original article

Climate change impact and anthropogenic activity on the hydrometeorological regime and the ecosystem of the Baltic Sea

*Ekaterina V. Voloshchuk¹, Tatiana R. Eremina¹,
Evgenia K. Lange², Alexander S. Averkiev¹*

¹ Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

Summary. The paper studies the variability of hydrometeorological characteristics and components of the ecosystem of the Eastern part of the Gulf of Finland under climatic changes and anthropogenic activity. Positive trends in the variability of air temperature in the region, noted over the past climatic period, are also characteristic of modern conditions in 1991—2020. The rate of warming in the Gulf of Finland is quite high, about 0,58 °C/10 years, while the increase in surface air temperature is observed in all seasons of the year. Along with this, sea level rise is taking place. According to the calculations in the last 40 years the sea level in the Gulf of Finland has been growing by 4,3 mm per year.

Analysis of hydrochemical indicators such as the content of dissolved oxygen and phosphates in the bottom layer showed that the regime of these characteristics in the eastern part of the Gulf of Finland is characterized by significant interannual variability. Oxygen conditions are characterized by a weak trend towards a decrease in the dissolved oxygen content over 40 years. The positive trend in phosphate concentration in the bottom layer is caused by internal load of phosphorus, accumulated in bottom sediments, and its efflux during the hypoxic conditions.

The thermohaline regime continues to be one of the main factors determining the structural and functional characteristics of phytoplankton in the Eastern part of the Gulf of Finland. The observed increase in water temperature did not cause noticeable structural changes in phytoplankton communities during the study period.

Keywords: Gulf of Finland, climate, hydrometeorological characteristics, ecosystem variability.

Acknowledgments: The research presented in this study was realized in Russian State Hydrometeorological University and funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSZU—2023—0002. Statistical analysis of phytoplankton data was made within the framework of IO RAS project No. FMWE—2021—0007.

For citation: Voloshchuk E. V., Eremina T. R., Lange E. K., Averkiev A. S. Climate change impact and anthropogenic activity on the hydrometeorological regime and the ecosystem of the Baltic Sea. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 493—511 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-493-511.

Введение

Балтийское море — полузакрытый бассейн, находящийся под влиянием суши и крупномасштабных атмосферных процессов. Кроме того, Балтийское море является одним из самых больших солоноватых морей в мире. Изучение изменений климата показало, что потепление в регионе Балтийского моря сохраняется и будет продолжаться в течение всего двадцать первого века и отразится в первую очередь на температуре воды и ледовых условиях [1, 2]. Также наблюдаются

изменения в гидрологическом цикле, которые, как ожидается, будут становиться все более ярко выраженными в ближайшие десятилетия. Основными гидрометеорологическими характеристиками, в которых проявляется изменение климата, являлись повышение температуры поверхностного слоя моря, изменение стока рек, возможное распреснение, сокращение длительности ледового периода и площади покрытия льдом [1, 2].

С середины 1980-х гг. положительные тренды температуры поверхности Балтийского моря четко отмечаются по данным натурных наблюдений, дистанционного зондирования, а также по модельным оценкам.

Анализ многолетних данных измерений температуры поверхности воды позволил выделить период, когда рост температуры воды стал значительным. Так, например, на основе ежедневных наблюдений на маяках в датских водах установлено, что десятилетняя скользящая средняя температуры поверхности воды не показывала существенной изменчивости в период с 1904 г. по 1985 г. с текущими средними значениями 8,2—9,1 °С, однако далее до 1998 г. наблюдались значительные изменения и рост скользящего среднего до 9,8 °С, что на 0,7 °С выше такового в предыдущий период [3]. В исследовании [4] показано, что за период с 1982 г. по 2012 г. Балтийское море прогрелось на 1—2 °С с учетом всех месяцев года и на 3—5 °С, когда рассматривался только июль — сентябрь.

На основе спутниковых данных за период с января 1993 г. по декабрь 2017 г. [5] были рассчитаны линейные тренды температуры поверхности воды (ТПВ) для всего Балтийского моря. Средняя тенденция изменения поверхностной температуры моря (к востоку от 9° в. д.) составила $0,043 \pm 0,01$ °С/год («±» — стандартное отклонение), что дает среднее потепление на 1,1 °С за рассматриваемый период 1993—2017 гг.

Данные инфракрасных спутниковых снимков по температуре поверхности моря за период 1990—2008 гг. свидетельствуют о потеплении от 0,8 до 1 °С за десятилетие, при этом самые высокие значения линейного тренда наблюдаются в Ботническом и Финском заливах. Для центральной части моря потепление составило 0,5—0,9 °С/10 лет. Наименьшие тенденции наблюдаются вдоль восточного побережья Швеции (от 0,3 до 0,5 °С/10 лет), что, вероятно, является результатом апвеллинга в этой области [6].

Согласно оценкам, полученным по региональным моделям «океан—атмосфера», к концу XXI века рост среднегодовой температуры воздуха в Балтийском регионе, согласно сценариям RCP2.6 и RCP8.5, составит 1,5—4,3 °С [1]. Вслед за повышением температуры воздуха ожидаемо возрастет температура поверхности моря. В случае промежуточного (RCP4.5) и худшего (RCP8.5) сценариев климата среднегодовое изменение температуры поверхности Балтийского моря в период с 2006 г. по 2099 г. может составить около 0,18 и 0,35 °С за десятилетие соответственно [7]. Наиболее интенсивное потепление ожидается в северной части Балтийского моря, где наибольшие тренды оцениваются в 0,24 и 0,45 °С за десятилетие. Также существенным ожидается потепление в Финском заливе, особенно в зимний период.

Наряду с изменением климатических условий в Балтийском регионе наблюдается усиление антропогенной нагрузки на водоем. С 1950-х г. поступление биогенных веществ в Балтийское море увеличилось из-за роста населения и более интенсивного использования удобрений в сельском хозяйстве [8].

Поступление биогенных веществ достигло своего пика в 1980-х годах, но неуклонно снижалось после реализации стратегий сокращения поступления биогенных веществ в морскую среду. Тем не менее, начиная с 1960-х годов, для придонных вод Балтийского моря ниже постоянного галоклина характерно низкое содержание кислорода и крупномасштабная гипоксия [9].

Изменения экосистемных процессов в Балтийском море обычно изучаются на основе модельных оценок [7, 10—13] с учетом климатических сценариев и уровней биогенной нагрузки на водоем. Часто для этого используется промежуточный (RCP4.5) и худший (RCP8.5) сценарии [14]. По уровню биогенной нагрузки выделяют сценарий снижения нагрузок согласно Плану действий по Балтийскому морю (Baltic Sea Action Plan, BSAP) [15].

Общей чертой этих оценок является увеличение поступления биогенных соединений с суши и расширение гипоксических зон, однако масштаб этих изменений значительно различается при использовании большого спектра глобальных, региональных моделей и моделей Балтийского моря [7, 12]. Расхождение оценок объясняется разницей в задании в моделях доли биодоступных биогенных веществ, поступающих с суши [16]. Вместе с тем, во всех моделях сценарии BSAP характеризуется более низкими нагрузками по сравнению с задаваемыми в моделях историческими нагрузками за выбранные периоды в XX в. и начале XXI в. Изменение поступления питательных веществ, согласно сценариям BSAP, будет оказывать большее влияние на биогеохимический цикл в Балтийском море, чем изменение климата. Воздействие климата на экосистему моря будет более выраженным при высоких нагрузках биогенных веществ. Следовательно, без дальнейшего сокращения поступления питательных веществ, как это предлагается в BSAP, эвтрофикация и кислородное истощение будут усиливаться [7].

Оценка изменчивости концентрации кислорода в придонном слое значительно различается по отдельным моделям (табл. 1). Оценки приведены для летнего периода и усреднены по всему Балтийскому морю, включая Каттегат. В мелководных районах моря без выраженного галоклина концентрация кислорода в придонном слое, согласно модельным расчетам, будет снижаться вследствие более низкой концентрации насыщения кислородом при повышении температуры воды. В глубоководных районах с выраженным галоклином концентрация O_2 зависит преимущественно от сценария биогенной нагрузки.

В последнее десятилетие особенно значительный рост температуры отмечался в Финском заливе Балтийского моря [1, 17]. Известно, что Финский залив относится к одной из наиболее эвтрофированных акваторий моря с высоким уровнем биогенной нагрузки, поступающей со стоком р. Невы. Современная экосистема залива функционирует под давлением этих двух факторов. Значительное снижение биогенной нагрузки, обусловленное реализацией мер, предусмотренных в Плане действий (доочистка сточных вод от фосфора и другие меры), должно

было привести к улучшению качества вод и понижению уровня эвтрофирования. Однако современные исследования показывают, что ожидаемого улучшения не произошло. Возможной причиной этого стало глобальное потепление климата. В связи с этим целью работы является оценка изменения отдельных компонентов экосистемы восточной части Финского залива на основе данных наблюдений в условиях изменения климата и биогенной нагрузки.

Таблица 1

Средние по ансамблю изменения концентрации кислорода на дне в летний период (в мл/л) по различным климатическим моделям Балтийского моря с учетом сценариев биогенной нагрузки. В ECOSUPPORT изменения кислорода рассчитаны для периодов с 1976 г. по 2005 г. и с 2069 г. по 2098 г., в BalticAPP/CLIMSEA — для периодов с 1978 г. по 2007 г. и с 2069 г. по 2098 г. В CLIMSEA расчеты приведены для условий среднего и высокого уровня моря [7].

Ensemble average changes in the average oxygen concentration (ml/l) at the bottom in summer according to various climatic models of the Baltic Sea, taking into account biogenic load scenarios. In ECOSUPPORT oxygen changes are calculated between the periods 1976—2005 and 2069—2098, in BalticAPP/CLIMSEA —between the periods 1978—2007 and 2069—2098. In CLIMSEA calculations are given for medium and high sea level conditions [7].

Модель Сценарий Уровень моря	ECOSUPPORT A1B/A2	BalticAPP RCP4.5	BalticAPP RCP8.5	CLIMSEA RCP4.5 средний	CLIMSEA RCP4.5 высокий	CLIMSEA RCP8.5 средний	CLIMSEA RCP8.5 высокий
BSAP	–0,1	+0,6	+0,5	+0,6	+0,5	+0,4	+0,3
REF	–0,6	+0,1	–0,2	0	–0,1	–0,2	–0,4
BAU	–1,1	–	–	–	–	–	–
WORST	–	–0,1	–0,5	–	–	–	–

Материалы и методы исследования

Для оценки трендов гидрометеорологических характеристик применялись методы статистического анализа (тренды рядов, среднее квадратическое отклонение, ящики с усами). Основой для расчетов послужили данные наблюдений в Выборгском заливе (вблизи г. Выборг) за период с 1991 г. по 2020 г. Для анализа изменения температуры воздуха использовалась база данных Met Office Hadley Centre observations data sets, version 5. Среднемесячные данные по температуре воды на глубинах 5 и 15 м в прибрежной части Выборгского залива были взяты из базы CARTON—GIESE SODA (version 2.0.2—4) за период с 1991 г. по 2008 г. Данные по уровню моря получены из сетки карты аномалий уровня моря на основе измерений альтиметра DUACS delayed—time (версия DT—2018). Эти продукты распространяются Службой изменения климата Copernicus (sealevel_glo_phy_climate_14_rep_observations_008_057).

Данные натурных наблюдений по содержанию фосфатов и кислорода в придонном слое, используемые в статье, были получены в ходе экспедиционных исследований РГГМУ (рис. 1); в восточной части Финского залива в позднелетний

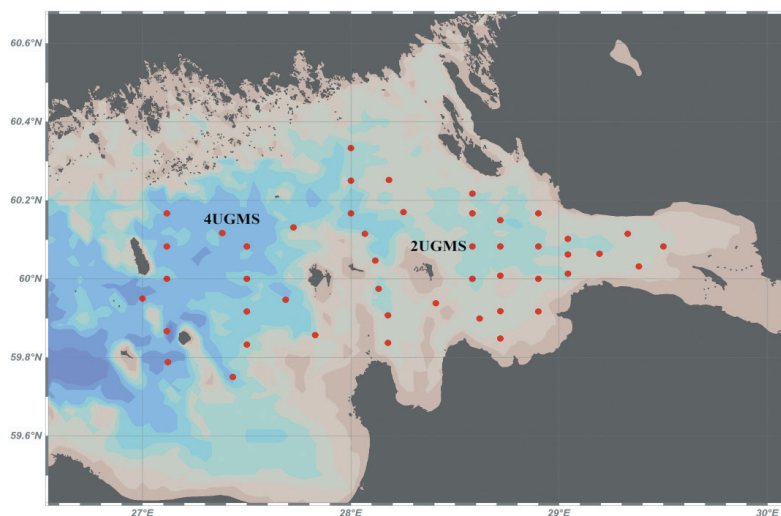


Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб РГГМУ в период с 1996 г. по 2016 г.

Fig. 1. Map of RSHU sampling stations in 1996—2016.

период с 1996 г. по 2016 г.; за более ранний период с 1978 г. по 1995 г. использовались данные Северо-Западного УГМС. Набор исследуемых станций отличался год от года, однако на мониторинговых станциях 2UGMS и 4UGMS исследования выполнялись практически каждый год. Анализ многолетней изменчивости биомассы и состава фитопланктона в различных районах восточной части Финского залива выполнен за период с 2000 г. по 2016 г.

Для визуализации результатов использовались программные пакеты Ocean Data View, Microsoft Office и STATISTICA.

Результаты и обсуждение

1. Анализ трендов гидрометеорологических характеристик в восточной части Финского залива.

Анализ изменений среднегодовой приповерхностной температуры воздуха в г. Выборг свидетельствует о быстром ее росте с 1990-х г. по настоящее время (рис. 2). Величина тренда составляет $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, что соответствует росту температуры $1,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ за последние тридцать лет. Эта оценка несколько выше той, что получена для Финского залива за период с 1970 г. по 2007 г. [1], когда линейный тренд изменения температуры воздуха составил около $0,35\text{—}0,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие.

Вследствие различий в тенденциях изменчивости температуры воздуха в различные сезоны года расчеты проведены раздельно (рис. 3), а величины полученных линейных трендов проверены на значимость (табл. 2). Положительные тренды температуры воздуха выявлены во все сезоны года, но наиболее отчетливо они выражены в осенний период, когда темпы потепления составляют $0,86\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$,

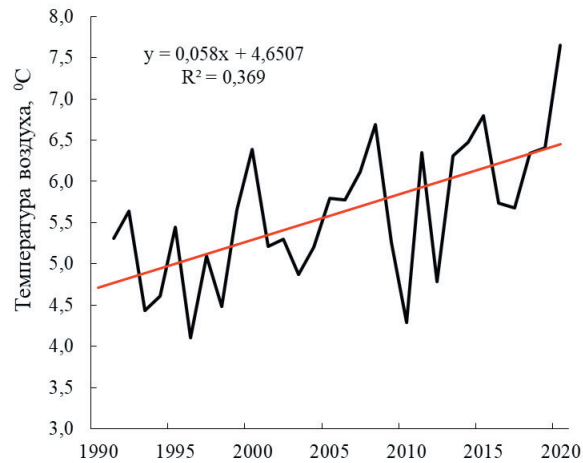


Рис. 2. Изменчивость среднегодовой приповерхностной температуры воздуха в г. Выборг за период с 1991 г. по 2020 г.

Fig. 2. Variability of mean annual near—surface air temperature in Vyborg for the period from in 1991 to 2020.

что соответствует росту температуры на 2,58 °C. Колебания температуры воздуха в зимний период отличались высокой амплитудой: очень теплые зимы со средними значениями от -1 до -3 °C, нередко с положительными температурами в декабре, которые чередовались с более холодными. Для исследуемого района характерна тенденция смещения сезонов года, более позднего перехода через 0 °C в зимний период и позднего похолодания осенью. Увеличилось суммарное за год количество дней с температурой выше 0 °C, около 10 дней/10 лет, а количество морозных дней (с температурой ниже -10 °C) сократилось на 2/10 лет. За исследуемый тридцатилетний период наиболее теплым был 2020 г., когда общее количество дней с температурой выше 0 °C составило 308, а среднесуточная температура в холодный период не опускалась ниже -6 °C. Такая тенденция сезонной изменчивости для г. Выборг за последние тридцать лет в целом согласуется с данными для Балтийского региона за более ранний период [17].

Таблица 2

Линейный тренд изменения температуры воздуха (°C/10 лет) в г. Выборг, рассчитанный за период с 1991 г. по 2020 г.

Linear trend of air temperature change (°C/10 years) in Vyborg, calculated for the period 1991—2020

Год	Зима	Весна	Лето	Осень
0,58	0,33	0,55	0,26	0,86

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значимые величины тренда (по критерию Стьюдента при $p < 0,05$)

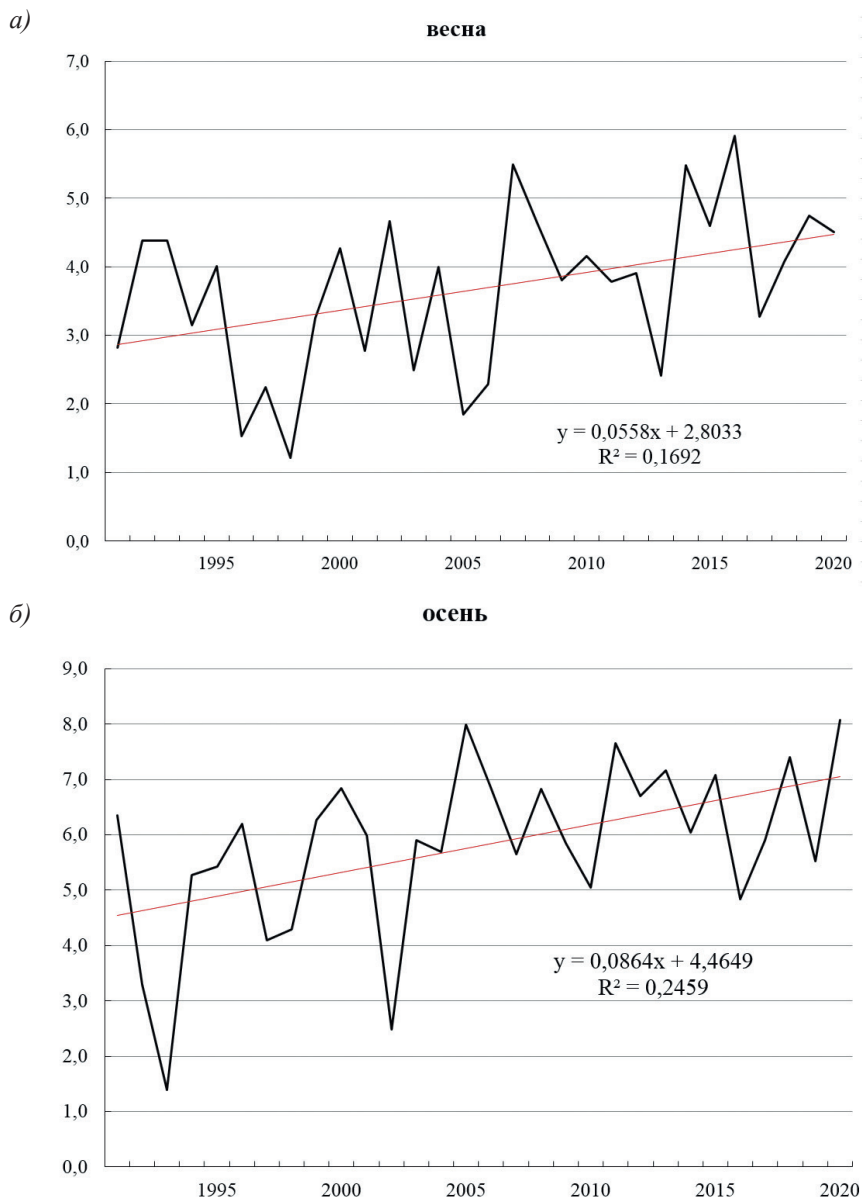


Рис. 3. Межгодовой ход среднесезонной температуры воздуха и ее линейный тренд в г. Выборг за период с 1991 г. по 2020 г.

a — весна, *б* — осень.

Fig. 3. Seasonal air temperature and linear trends of its variability in Vyborg for the period from 1991—2020:

a — spring, *б* — autumn.

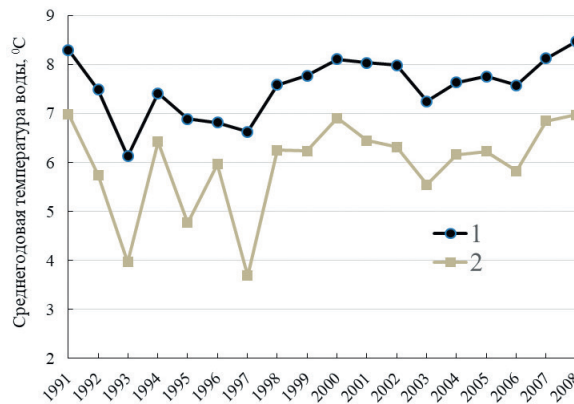


Рис. 4. Изменчивость среднегодовой температуры воды в прибрежной части Выборгского залива за период с 1991 г. по 2008 г.

1 — на глубине 5 м, 2 — на глубине 15 м.

Fig. 4. Mean annual water temperature in the coastal part of the Vyborg Bay for the period from 1991 to 2008.

1 — at 5 m depth, 2 — at 15 m depth.

Данные дистанционного зондирования показывают, что осредненная за год температура вод на глубине 5 м в Выборгском заливе (вблизи г. Выборг) имеет тенденцию к потеплению, причем с той же скоростью, что и температура воздуха, т. е. около $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (рис. 4). Примерно с такой же скоростью изменялась температура поверхностных вод у побережья Литвы в период с 1990-х гг. по 2008 г. ($0,3\text{—}0,9\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) [18].

Изучая влияние современного изменения климата на режим восточной части Финского залива, необходимо рассматривать межгодовую изменчивость уровня воды. Надежные и длительные ряды наблюдений имеются лишь на немногих станциях на побережье Балтики и Финского залива, например, на водомерном посту г. Кронштадт [19, 20]. Как известно, наиболее отчетливые климатические изменения начались в последней четверти XX в., что обусловило выбор для анализа временных рядов уровня воды. Средние месячные значения репрезентативны и отражают суммарные колебания уровня синоптического масштаба и подъемы уровня в периоды наводнений. При анализе ряда среднемесячных значений уровня оказалось, что если рассматривать период с 1900 г. по 1979 г., то норма равна $-0,17\text{ см}$, среднее квадратическое отклонение равно $19,97\text{ см}$, а для периода с 1980 г. по 2018 г. норма увеличилась до $8,18\text{ см}$, причем среднее квадратическое отклонение также увеличилось до $21,62\text{ см}$.

Поскольку такое повышение нормы значимо по критерию Стьюдента при данной длине рядов (примерно 1300 значений), то его необходимо учитывать в климатических расчетах и при оценке отклонений уровня от среднего (рис. 5). Увеличение нормы на $8,35\text{ см}$ означает наличие во временном ряду за 1980—2018 гг. положительного тренда. Его расчет показал, что уровень моря повышается

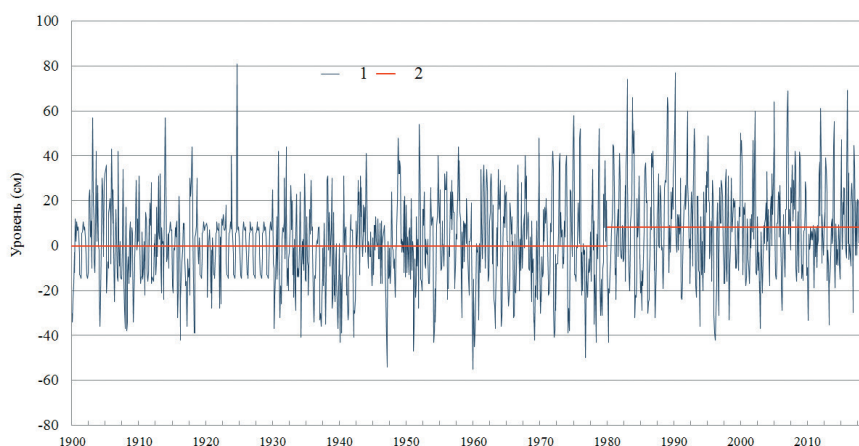


Рис. 5. Временной ряд среднемесячных значений уровня воды в г. Кронштадте за 1900—2018 гг. (1) и средние значения (нормы) за периоды с 1900 г. по 1979 г. и с 1980 г. по 2018 г. (2).

Fig. 5. Time series of mean monthly sea level in Kronstadt for 1900—2018 (1) and mean values (norms) for the periods 1900—1979 and 1980—2018 (2).

со скоростью 2,4 мм/год. По оценкам других авторов [21, 22], уровень моря в Балтийском море и Финском заливе с начала 1990-х гг. повышался на 2—4 мм в год, причем в заливах его рост может быть и выше.

2. Основные тренды экосистемных характеристик в восточной части Финского залива.

В связи с проблемой эвтрофирования восточной части Финского залива наибольший интерес у исследователей в последние два десятилетия вызывало изучение режима биогенных соединений, в особенности фосфора, а также кислородного режима в придонных водах и анализ факторов, обуславливающих возникновение гипоксии [9, 23—27]. Ухудшение кислородного режима может быть вызвано как природными факторами, так и антропогенным эвтрофированием [28—30]. В Финском заливе систематически наблюдаются гипоксийно-аноксические явления в придонных слоях воды. Условия их возникновения хорошо изучены [25, 26].

На режим фосфатов придонного слоя оказывают влияние затоки вод повышенной солености из открытой части залива, приводящие к многократному увеличению содержания фосфатов в эстуарии р. Невы [31]. Кроме того, запасы фосфора, накопленные в донных отложениях, играют роль дополнительного источника фосфатов при возникновении аноксических условий в придонных слоях.

Результаты анализа данных наблюдений показывают значительную межгодовую изменчивость содержания кислорода в придонном слое и слабый линейный тренд на снижение его концентрации (рис. 6 а). В тоже время отмечена тенденция к росту содержания фосфатов (рис. 6 б). В связи с отсутствием данных

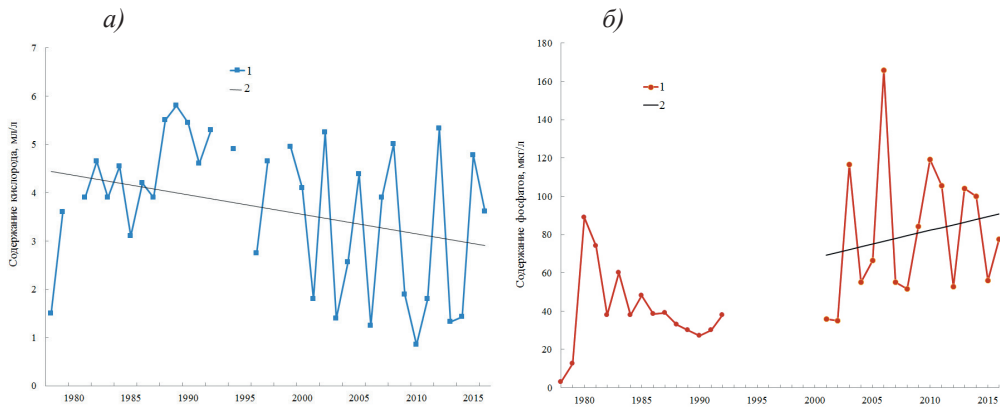


Рис. 6. Межгодовая изменчивость гидрохимических показателей в придонном слое на станции 4UGMS.

a — содержание растворенного кислорода (1) и линейный тренд его ряда (2),
б — концентрация фосфатов (1) и линейный тренд ряда (2).

Fig. 6. Interannual variability of hydrochemical characteristics in the bottom layer at 4UGMS station.

a — content of dissolved oxygen (1) and the linear trend of its variability (2),
б — concentration of phosphates (1) and the linear trend of the series (2).

по содержанию фосфатов за период с 1993 г. по 2000 г. линейный тренд их изменчивости был построен по данным с 2001 г. по 2016 г.

Повышение температуры поверхности моря в летний период будет приводить к усилению вертикальной стратификации и препятствовать перемешиванию вод в заливе. Рост зимних температур способствует ослаблению стратификации и, как следствие, улучшению кислородных условий у дна. В тоже время кислородный режим в Финском заливе определяют и некоторые другие природные гидрометеорологические и биогеохимические процессы [26, 32], а также антропогенное эвтрофирование [28—30].

Действие природных процессов развивается одновременно с действием антропогенного фактора, выражающегося в высоком уровне биогенных соединений, поступающих в залив со стоком реки Невы. В период с 2007 г. по 2013 г. речной сток в Финский залив превышал среднемноголетний 3490 м³/с, однако поступление фосфора от этого источника было ниже, чем среднемноголетнее 6000 т/год. Снижение поступления фосфора обусловлено высокой степенью очистки сточных вод и мерами, принятыми на заводе по производству удобрений «Фосфорит» в бассейне р. Луга [33, 34].

Для оценки изменений в экосистеме с точки зрения развития эвтрофирования и потепления климата несомненный интерес представляет изменчивость структурно-функциональных характеристик фитопланктона в восточной части Финского залива. Анализ многолетней изменчивости биомассы и состава фитопланктона показал, что существует статистически значимая обратная связь

между числом таксонов в пробах фитопланктона (α -разнообразие) и поверхностной соленостью воды, при этом связь наиболее выражена в мелководном районе (II). За период с 2002 г. по 2016 г. в мелководном районе коэффициент корреляции Спирмена составляет $-0,54$ ($n = 55$) при $p < 0,05$ против $-0,45$ ($n = 89$) и $-0,26$ ($n = 117$) во внутреннем (IIIa) и внешнем районах (IIIb) глубоководной части залива соответственно. Для всей акватории отрицательная корреляция между рассматриваемыми характеристиками оказывается выше и составила $-0,66$ ($n = 258$, $p < 0,000$).

В мелководном районе, где происходит смешение соленых и пресных вод, режим солености нестабилен (рис. 7). Осолонение вод является одной из причин снижения видового разнообразия пресноводных зеленых водорослей в среднем до 15 таксонов (при оптимуме свыше 20 таксонов). Во внутреннем глубоководном районе с увеличением солености воды в среднем до $2,60 \pm 0,36$ ‰ число видов в фитопланктонах варьирует от 13 до 41. К западу при средней солености $3,91 \pm 0,12$ ‰ во внешнем глубоководном районе таксономическое разнообразие сокращается в среднем до 10 ± 1 (рис. 8).

По многолетним данным, в мелководном районе при поверхностной солености в среднем до $1,35$ — $2,05$ ‰ в 2003 г., с 2007 г. по 2009 г., в 2014 г. α -разнообразие не поднималось выше 20—30 таксонов/проба. Опреснение в среднем до $0,24$ — $1,23$ ‰ в 2002 г., с 2004 г. по 2006 г., с 2010 г. по 2012 г., в 2016 г. сопровождалось увеличением этого показателя до 40—80 таксонов. Наибольшим α -разнообразием фитопланктона отличался 2011 г. (рис. 8, II+IIIa). В западном

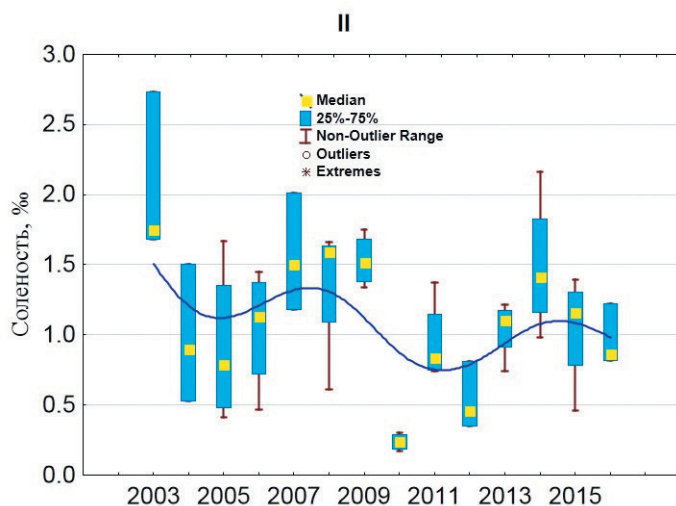


Рис. 7. Изменение поверхностной солености воды в мелководном районе восточной части Финского залива в июле — августе 2000-х гг.

Fig. 7. Changes in surface salinity in the shallow parts of the Eastern part of the Gulf of Finland in July—August of the 2000s.

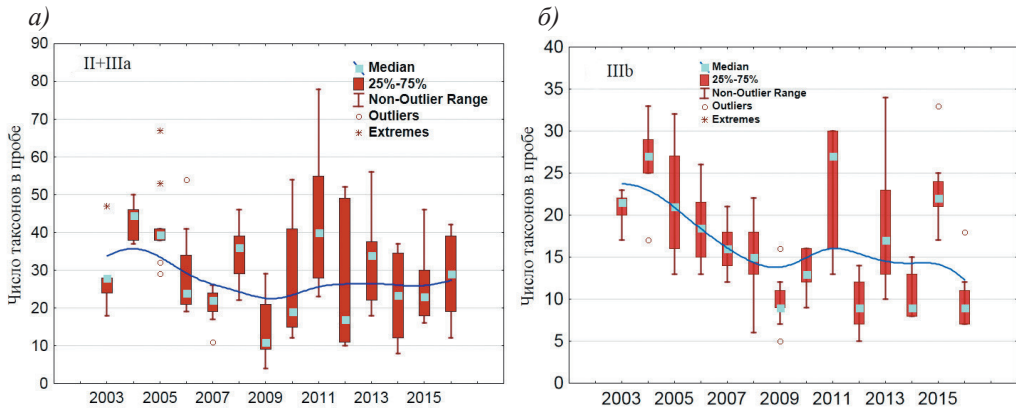


Рис. 8. Таксономическое разнообразие позднелетнего фитопланктона в различных районах восточной части Финского залива в 2000-х гг.

а — мелководный и внутренний глубоководный районы (II+IIIa),
б — внешний глубоководный район (IIIb) [35].

Fig. 8. Taxonomic diversity of late—summer phytoplankton in various parts of the Eastern Gulf of Finland in the 2000s.

а — shallow and inner deep—water areas (II+IIIa), б — outer deep—water area (IIIb) [35].

направлении с увеличением солености воды α -разнообразие фитопланктона за счет сокращения видов зеленых и диатомовых снижалось (рис. 8, IIIb). После большого затора в Балтику в 2014 г. и 2015 г. отмечалось повышение таксономического разнообразия фитопланктона во внешнем глубоководном районе Финского залива и понижение — в 2016 г. Аналогичная картина наблюдалась после затора в 2003 г. (рис. 8, IIIb).

В течение всего периода наблюдений сине-зеленые водоросли (цианобактерии) периодически становились доминантами фитопланктона восточной части Финского залива. Во всех районах залива чаще других превалировал род *Aphanizomenon*, в основном *Aphanizomenon flosaquae*. Во внешнем глубоководном районе в отдельные годы в числе доминантов оказывались *Nodularia* и *Anabaena*. С 2002 г. по 2016 г. обилие позднелетнего фитопланктона определяли цианобактерии как в мелководном, так и в глубоководном районе. Развитие характерных для Балтийского моря и Финского залива цианобактерий *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Anabaena*, относящихся к азотфиксирующим, потенциально токсичным и вызывающим цветение воды [36, 37], не носило массового характера. В среднем по районам II и IIIa суммарная биомасса цианобактерий *Aphanizomenon*, *Nodularia* и *Anabaena* варьировалась по годам от 0,01 до 0,95 г/м³. Криptomonеды (*Cryptomonadales*) в продуктивности фитопланктона всех трех районов залива периодически играют заметную роль с 2007 г., а в 2016 г. криптомонады доминировали только во внешнем глубоководном районе (IIIb), где их доля в биомассе достигала 26 % (в среднем 10,5 %), при этом максимум зафиксирован в мелководном районе — 120 мг/м³.

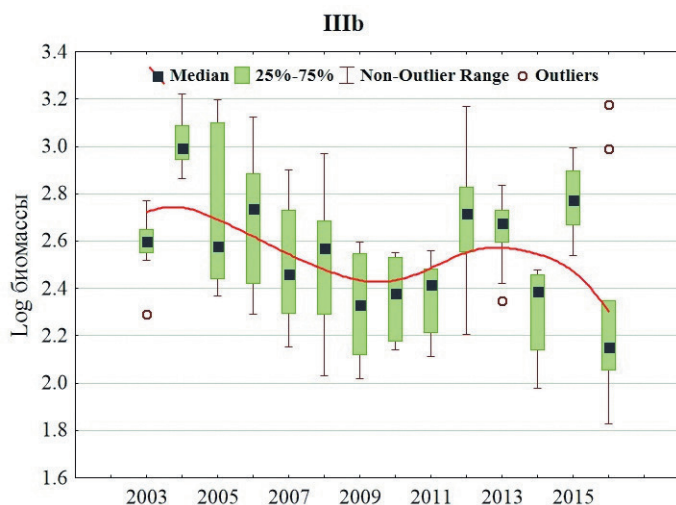


Рис. 9. Динамика биомассы фитопланктона внешнего глубоководного района IIIb восточной части Финского залива в июле — августе с 2003 г. по 2016 г.

Fig. 9. Dynamics of phytoplankton biomass of the outer deepwater part IIIb of the Eastern Gulf of Finland in July—August 2003—2016.

Следует отметить, что биомасса фитопланктона внешнего глубоководного района в 2016 г. по сравнению с таковой в период с 2009 г. по 2014 г. была ниже зафиксированных ранее значений (рис. 9). После большого затора в Балтику в 2014 г. отмечалось повышение таксономического разнообразия и биомассы фитопланктона во внешнем глубоководном районе и понижение в 2016 г. Аналогичная картина наблюдалась после затора в 2003 г.

Закключение

В прибрежной части Балтийского моря (Выборгский залив) за период с 1991 г. по 2020 г. отмечается рост приземной температуры воздуха, причем во все сезоны года. Наибольшая скорость потепления наблюдалась в осенний период ($0,86\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), а в среднем за год величина тренда составила $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Среднегодовая температура воды на глубине 5 м в Выборгском заливе увеличилась на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, однако на глубине 15 м положительный тренд выражен очень слабо.

Наряду с этим происходит повышение уровня Финского залива со скоростью около $2,4\text{ мм/год}$ за период с 1980 г. по 2018 г. Анализ гидрохимических показателей (содержание растворенного кислорода и фосфатов в придонном слое) показал, что их режим в восточной части Финского залива отличается значительной межгодовой изменчивостью. Для кислородных условий в летний период в придонных слоях восточной части Финского залива характерен слабый тренд к понижению содержания растворенного кислорода за сорок лет. Однако поскольку

формирование кислородных условий в глубоководных районах залива зависит от целого ряда факторов, то выделить, какие из них являются определяющими (антропогенные или природные) на основе данных наблюдений не представляется возможным. Для решения этой проблемы требуется использование математических моделей и проведение сценарных расчетов с привлечением климатических сценариев и с учетом изменения биогенных нагрузок.

Положительный тренд в изменении содержания фосфатов в придонном слое обусловлен внутриводными процессами, что связано с огромными запасами фосфатов, накопленными в донных отложениях и поступающими в водную среду при возникновении гипоксических условий [38]. Климатические факторы, приводящие к увеличению продолжительности теплого периода осенью и, как следствие, продлению вегетационного периода, могут способствовать накоплению фосфатов в результате минерализации образующегося органического вещества.

Кроме этого, высокое содержания фосфора в воде в 2010-х гг. может быть связано с неблагоприятными погодными условиями в период с 2012 г. по 2016 г., а именно большим количеством осадков в Санкт-Петербурге в середине лета и ростом поверхностного и речного стока. Значительная корреляционная связь также была получена между содержанием общего фосфора в эстуарии Невы и количеством дождливых дней в июле [39]. Возможно, такая закономерность может наблюдаться и для глубоководного района Ша.

Одним из главных факторов, определяющим структурно-функциональные характеристики фитопланктона в восточной части Финского залива, продолжает оставаться термогалинный режим. Наблюдаемое повышение температуры воды заметных структурных изменений в фитопланктонных сообществах за период исследований не вызвало.

Список литературы

1. BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Science & Business Media, 2015. 501 p. doi:10.1007/978-3-319-16006-1.
2. Костяной А. Г., Ерёмина Т. Р., Иванов В. В. и др. Морские природные системы / Третий оценочный доклад об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. С. 202—207.
3. Madsen K. S., Hojerslev N.K. Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone // *Boreal Environ Res.* 2009. 14. P. 125—131.
4. Hoyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea // *Journal of Climate.* 2016. 29. 7. P. 2529—2541. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0663.1.
5. Mulet S., Nardelli B. B., Good S. et al. Ocean temperature and salinity. / In: Copernicus Marine Service Ocean State Report. 2018. Issue 2 *Journal of Operational Oceanography*, 11: sup1, P. 13—16. doi: 10.1080/1755876X.2018.1489208.
6. Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J. Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958—2009 // *Climate Res.* 2011. 46. P. 185—196. doi:10.3354/cr00876.
7. Meier M., Dieterich C., Gröger M. et al. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100 // *Earth Syst. Dynam.* 2022. 13.P. 159—199. doi: 10.5194/esd-13-159-2022.
8. Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850—2006 // *Ambio.* 2012. 41. P. 534—548. doi:10.1007/s13280-012-0318-x.
9. Савчук О. П. Исследование эвтрофикации Балтийского моря // *Труды Государственного океанографического института.* 2005. Т. 209. 272 с.

10. Isaev A. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate // *Journal of Marine Systems*. 2017. V. 171, P. 81—88. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.08.005.
11. Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V. et al. Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate // *Oceanologia*. 2016. 56. P. 36—45. doi: 10.1134/S0001437016010161.
12. Meier M., Edman M. K., Eilola K. J. et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi-model ensemble simulations // *Front. Mar. Sci*. 2018. V. 5. Article 440. doi: 10.3389/fmars.2018.00440.
13. Ерѣмина Т. Р., Исаев А. В., Рябченко В. А. Оценка и прогноз тенденций в эволюции экосистемы восточной части Финского залива при различных сценариях изменения биогенной нагрузки в будущем климате // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2014. № 36. С. 118—127.
14. Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. 2010. 463. P. 747—756. doi: 10.1038/nature08823.
15. HELCOM. Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki. 2007. 103 p.
16. Eilola K., Gustafsson B. G. Kuznetsov I. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state of the art numerical models of the Baltic Sea // *J. Mar. Syst*. 2011. 88. P. 267—284. doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.05.004.
17. BACC Author Team Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (Regional Climate Studies) (Berlin: Springer) 2008. 474 p.
18. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic // *Oceanologia*. 2011. 53. P. 293—308. doi: 10.5697/oc.53-1-TI.293.
19. Bogdanov V. I., Medvedev M. Yu., Solod. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state of the art numerical models of the Baltic Sea // *Reports of the Finnish Geodetic Institute*. 2000. V.1. 34 p.
20. Богданов В. И. Кронштадтский футшток и его Шепелевский дублер. СПб.: Нестор—История. 2015. 248 с.
21. Madsen K. S., Høyer J. L., Suursaar Ü. et al. Sea Level Trends and variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry // *Front. Earth Sci*. 2019. Vol. 7. Art. 243. P. 1—12. doi: 10.3389/feart.2019.00245.
22. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Митина Ю. В. Изменчивость невских наводнений и морского уровня в Финском заливе в современных климатических условиях // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 5. С. 544—557. doi: 10.7868/S0321059615030098.
23. Savchuk O., Wulff F. Modelling regional and large-scale response of Baltic Sea ecosystems to nutrient load reductions // *Hydrobiologia*. 1999. Vol. 393. P. 35—43. doi: 10.1023/A:1003529531198.
24. Pitkänen H., Lehtoranta J., Räsänen A. Internal nutrient fluxes counteract decreases in external load: the case of the estuarine Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea // *AMBIO J. of the Human Environment*. 2001. 30(4). P. 195—201. doi: 10.1579/0044-7447-30.4.195.
25. Максимов А. А. Причины возникновения придонной гипоксии в восточной части Финского залива Балтийского моря // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 2. С. 204—210.
26. Ерѣмина Т. Р., Максимов А. А., Волощук Е. В. Влияние изменчивости климата на кислородный режим глубинных вод восточной части Финского залива // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 6. С. 1—9.
27. Владимирова О. М., Ерѣмина Т. Р., Исаев А. В. и др. Модельные оценки составляющих баланса азота и фосфора в экосистеме Финского залива // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2018. № 53. С. 72—82.
28. Zillén L., Conley D. J., Andrén T. et al. Past occurrence of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // *Earth Sci. Rev*. 2008. 91. P. 77—92. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.
29. Golubkov S., Alimov A. Ecosystem changes in the Neva Estuary (Baltic Sea): Natural dynamics or response to anthropogenic impacts? // *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 61. No. 4—6. P. 198—204. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.014.

30. Conley D. J., Carstensen J., Aigars J. et al. Hypoxia is increasing in the coastal zone of the Baltic sea // *Environmental Science and Technology*. 2011. 45 (16). P. 6777—6783. doi: 10.1021/es201212r.
31. Шарова О. В., Ерёмкина Т. Р., Ланге Е. К. Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2016. 44. С. 129—140.
32. Ерёмкина Т. Р., Волощук Е. В., Максимов А. А. Оценка биогеохимических изменений в донных отложениях восточной части Финского залива вследствие вселения полихет *Marenzelleria* spp. // *Известия РГО*. 2016. Т. 148. Вып. 1. С. 55—71.
33. Atkins International Ltd. PG Phosphorit LLC: Assessment of Collection and Treatment System for Surface Waters and Monitoring of Phosphorus Loads to the River Luga. Final Report. 2015. 41.
34. Vodokanal of St. Petersburg. Annual Report 2014. Vodokanal. 2015. P. 249.
35. Pitkänen H. Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary // *Aqua Fennica*. 1991. 21 (2). P. 105—115.
36. Niemi Å. Blue—green algal blooms and N: P ratio in the Baltic Sea // *Acta Botanica Fennica*. 1979. V. 110. P. 57—61.
37. Kononen K. Dynamics of the toxic cyanobacterial blooms in the Baltic Sea // *Finnish Marine Research*. 1992. V. 261. P. 1—36.
38. Savchuk O. P., Eremina T.R., Isaev A. V., Neelov I. A. Response of eutrophication in the Eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios // *Hydrobiologia*. 2009. Vol. 629. No. 1. P. 225—237. doi: 10.1007/s10750-009-9776-y.
39. Golubkov M., Golubkov S. Eutrophication in the Neva Estuary (Baltic Sea): Response to temperature and precipitation patterns // *Marine and Freshwater Research*. 2020. Vol. 71. No. 6. P. 641—652. doi 10.1071/MF18422.

References

1. BACC II Author Team. Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. *Springer Science & Business Media*. 2015: 501 p. doi:10.1007/978-3-319-16006-1.
2. Kostyanoy A. G., Eremina T. R., Ivanov V. V. et al. Marine environmental systems. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. *Rosgidromet. SPb.: Naukoemkie tehnologii. = High-tech technologies*, 2022: 202—207. (In Russ.).
3. Madsen K. S., Hojerslev N. K. Long-term temperature and salinity records from the Baltic Sea transition zone. *Boreal Environ Res*. 2009; (14):125—131.
4. Høyer J. L., Karagali I. Sea surface temperature climate data record for the North Sea and Baltic Sea. *Journal of Climate*. 2016; 29 (7): 2529—2541. doi: 10.1175/JCLI-D15-0663.1.
5. Mulet S., Nardelli B. B., Good S. et al. Ocean temperature and salinity. In: Copernicus Marine Service Ocean State Report. 2018. Issue 2. *Journal of Operational Oceanography*, 11; sup. (1):13—16. doi: 10.1080/1755876X.2018.1489208.
6. Lehmann A., Getzlaff K., Harlaß J. Detailed assessment of climate variability of the Baltic Sea area for the period 1958—2009. *Climate Res*. 2011; (46):185—196. doi:10.3354/cr00876.
7. Meier M., Dieterich C., Gröger M. et al. Oceanographic regional climate projections for the Baltic Sea until 2100. *Earth Syst. Dynam.* 2022; (13):159—199. doi: 10.5194/esd-13-159-2022.
8. Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850—2006. *Ambio*. 2012; (41):534—548. doi: 10.1007/s13280-012-0318-x.
9. Savchuk O. P. Baltic Sea eutrophication study. *Trudi Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta. = Proceedings of the State Oceanographic Institute*. 2005; 209: 272 p. (In Russ.).
10. Isaev A. V., Eremina T. R., Ryabchenko V. A., Savchuk O. P. Model estimates of the impact of bioirrigation activity of *Marenzelleria* spp. on the Gulf of Finland ecosystem in a changing climate. *Journal of Marine Systems*. 2017; (171):81—88. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.08.005.
11. Ryabchenko V. A., Karlin L. N., Isaev A. V. et al. Model estimates of the eutrophication of the Baltic Sea in the contemporary and future climate. *Oceanology*. 2016; (56):36—45. doi: 10.1134/S0001437016010161.

12. Meier M., Edman M. K., Eilola K. J. et al. Assessment of eutrophication abatement scenarios for the Baltic Sea by multi—model ensemble simulations. *Front. Mar. Sci.* 2018; 5(440). doi: 10.3389/fmars.2018.00440.
13. Eremina T. R., Isaev A. V., Ryabchenko V. A. Assessment and forecast of the trends in the ecosystem evolution of the Eastern part of the Gulf of Finland under different scenarios of changes in nutrient loading in a future climate. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = *Proceedings of Russian State Hydrometeorological University*. 2014; (36):(118—127). (In Russ.).
14. Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010; (463):747—756. doi:10.1038/nature08823.
15. HELCOM. Baltic Sea Action Plan. Helsinki Commission Publ. Helsinki. 2007:103 p.
16. Eilola K., Gustafsson B. G., Kuznetsov I. et al. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state of the art numerical models of the Baltic Sea. *J. Mar. Syst.* 2011; (88):267—284. doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.05.004.
17. BACC Author Team Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin (Regional Climate Studies) Berlin. Springer. 2008 : 474 p.
18. Dailidienė I., Baudler H., Chubarenko B., Navrotskaya S. Long term water level and surface temperature changes in the lagoons of the southern and eastern Baltic. *Oceanologia*. 2011; (53):293—308. doi: 10.5697/oc.53-1-TI.293.
19. Bogdanov V. I., Medvedev M. Yu., Solodov V. A. et al. Mean monthly series of sea level observations (1777—1993) at the Kronstadt gauge. *Reports of the Finnish Geodetic Institute*. 2000; (1): 34 p.
20. Bogdanov V. I. The Kronstadt footstock and its Shepelevsky understudy. SPb.: *Nestor—Istoriya* = *Nestor—History*, 2015: 248 p. (In Russ.).
21. Madsen K. S., Høyer J. L., Suursaar Ü., She J. and Knudsen P. Sea level trends and variability of the Baltic Sea from 2D statistical reconstruction and altimetry. *Front. Earth Sci.* 2019; 7:243. doi: 10.3389/feart.2019.00245.
22. Malinin V. N., Gordeeva S. M., Mitina U. V. Variability of the Neva floods and the sea level in the Gulf of Finland in modern climatic conditions. *Vodnie resursi* = *Water resources*. 2015; (42):(544—557). (In Russ.). doi: 10.7868/S0321059615030098.
23. Savchuk O., Wulff F. Modelling regional and large—scale response of Baltic Sea ecosystems to nutrient load reductions. *Hydrobiologia*. 1999; (393):35—43. doi: 10.1023/A:1003529531198.
24. Pitkänen H., Lehtoranta J., Räsänen A. Internal Nutrient Fluxes Counteract Decreases in External Load: The Case of the Estuarial Eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *AMBIO: A J. of the Human Environment*. 2001; 30(4): 195—201. doi: 10.1579/0044-7447-30.4.195.
25. Maximov A. A. Causes of bottom hypoxia in the eastern part of the Gulf of Finland of the Baltic Sea. *Okeanologiya* = *Oceanology*. 2006; (46):(204—210). (In Russ.).
26. Eremina T. R., Maximov A. A., Voloshuk E. V. Effects of climatic variability on deepwater oxygen conditions in the Eastern Gulf of Finland. *Okeanologiya* = *Oceanology*. 2012; (52):(1—9). (In Russ.).
27. Vladimirova O. M., Eremina T. R., Isaev A. V. et al. Model estimates of nitrogen and phosphorus budget components for the Gulf of Finland ecosystem. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. = *Proceedings of Russian State Hydrometeorological University*. 2018; (53):(72—82). (In Russ.).
28. Zillén L., Conley D. J., Andrén T. et al. Past occurrence of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth Sci. Rev.* 2008; (91):77—92. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.001.
29. Golubkov S., Alimov A. Ecosystem changes in the Neva Estuary (Baltic Sea): Natural dynamics or response to anthropogenic impacts? *Marine Pollution Bulletin*. 2010; 61(4—6): 198—204. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.02.014.
30. Conley D. J., Carstensen J., Aigars J. et al. Hypoxia Is Increasing in the Coastal Zone of the Baltic Sea. *Environmental Science & Technology*. 2011; 45 (16): 6777—6783. doi: 10.1021/es201212r.
31. Shatrova O. V., Eremina T. R., Lange E. K. Variability of parameters of eutrophication in the Gulf of Finland based on field observations. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. = *Proceedings of Russian State Hydrometeorological University*. 2016; (44):(129—140). (In Russ.).

32. Eremina T. R., Voloshchuk E. V., Maximov A. A. Assessment of biogeochemical changes in the sediments of the Eastern part of the Gulf of Finland due to invasion of polychaetes *Marenzelleria* spp. on observational data and modeling results. *Izvestiya RGO = Proceedings of Russian Geographical Society*. 2016; (148): (55—71). (In Russ.).
33. Atkins International Ltd. PG Phosphorit LLC: Assessment of Collection and Treatment System for Surface Waters and Monitoring of Phosphorus Loads to the River Luga. Final Report. 2015: 41 p.
34. Vodokanal of St. Petersburg. Annual Report 2014. *Vodokanal*. 2015: 249 p.
35. Pitkänen H. Nutrient dynamics and conditions in the eastern Gulf of Finland: the regulatory role of the Neva estuary. *Aqua Fennica*. 1991; 21 (2): 105—115.
36. Niemi Å. Blue—green algal blooms and N: P ratio in the Baltic Sea. *Acta Botanica Fennica*. 1979; (110): 57—61.
37. Kononen K. Dynamics of the toxic cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. *Finnish Marine Research*. 1992; (261): 1—36.
38. Savchuk O. P., Eremina T. R., Isaev A. V., Neelov I. A. Response of eutrophication in the eastern Gulf of Finland to nutrient load reduction scenarios. *Hydrobiologia*. 2009; 629(1): 225—237. doi: 10.1007/s10750-009-9776-y.
39. Golubkov M., Golubkov S. Eutrophication in the Neva Estuary (Baltic Sea): Response to temperature and precipitation patterns. *Marine and Freshwater Research*. 2020; 71(6): 641—652. doi 10.1071/MF18422.

Информация об авторах

Екатерина Васильевна Волощук, кандидат географических наук, доцент кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Российский государственный гидрометеорологический университет, Ketrin492006@mail.ru.

Татьяна Рэмовна Ерёмкина, кандидат физико-математических наук, доцент, директор Института гидрологии и океанологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Tanya.er@gmail.com.

Евгения Кирилловна Ланге, научный сотрудник лаборатории морской экологии Института океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, evlange@gmail.com.

Александр Сергеевич Аверкиев, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами, Российский государственный гидрометеорологический университет, asav@rshu.ru.

Information about authors

Ekaterina Vasilyevna Voloshchuk, PhD (Geogr.), Associate Professor of the Faculty of Applied oceanography and integrated coastal zone management of Russian State Hydrometeorological University, Ketrin492006@mail.ru.

Tatyana Removna Eremina, PhD (Phys. and Math. Sci.), Associate Professor, Director of the Institute of Hydrology and Oceanology of Russian State Hydrometeorological University, Tanya.er@gmail.com.

Evgeniya Kirillovna Lange, researcher at the Laboratory of Marine Ecology of Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, evlange@gmail.com.

Alexander Sergeevich Averkiev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor of the Faculty of Applied oceanography and integrated coastal zone management of Russian State Hydrometeorological University, asav@rshu.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 12.05.2023

Принята к печати после доработки 15.08.2023

The article was received on 12.05.2023

The article was accepted after revision on 15.08.2023