

Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 680—698.

Hydrometeorology and Ecology. 2025;(81):680—698.

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [556.114:556.54:574.583](282.247.29)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-680-698

Трансформация биогенного стока минерального азота фитопланктоном в эстуарии реки Преголи

**Сергей Валерьевич Александров, Юлия Александровна Горбунова,
Надежда Вадимовна Двоеглазова**

Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия, hydrobio@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено сезонное функционирование биологического фильтра, образуемого фитопланктоном, в эстуарии реки Преголи, который трансформирует биогенный сток. Выполнен сопоставительный анализ данных по гидрологии (соленость, температура), азоту нитратов, хлорофиллу «а» с марта по август 2024 г. Показано резкое увеличение обилия фитопланктона (хлорофилла) и снижение концентрации азота в средней зоне эстуария. Концентрации хлорофилла «а» в мае и августе в средней зоне достигали уровня «гиперцветения» вод. Ранней весной в период половодья в эстуарии использовалось до 2/3 биогенного стока по азоту. В теплый период межени при переходе от пресных к солоноватоводным условиям формировался мощный биофильтр из фитопланктона, в котором азот нитратов почти полностью извлекался. В результате уменьшается биогенная нагрузка на море, но происходит увеличение эвтрофирования средней (лагунной) зоны эстуария.

Ключевые слова: хлорофилл, азот, биологический фильтр, «цветение» воды, река, эстуарий, трофическое состояние.

Благодарности: Результаты исследований гидрологических условий и хлорофилла получены за счёт гранта Российского научного фонда №24-44-20027. Результаты исследований биогенных элементов получены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Авторы благодарят А. В. Килесо, Д. А. Найданова за помощь в выполнении экспедиционных работ и гидрохимических анализов.

Для цитирования: Александров В. А., Горбунова Ю. А., Двоеглазова Н. В. Трансформация биогенного стока минерального азота фитопланктоном в эстуарии реки Приголи // Гидрометеорология и экология. 2025. № 81. С. 680—698. doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-680-698.

Original article

Transformation of nutrient runoff of mineral nitrogen by phytoplankton in the Pregolya Estuary

*Sergey V. Aleksandrov, Yulia A. Gorbunova,
Nadezhda V. Dvoeglazova*

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
hydrobio@mail.ru

Summary. The Pregolya Estuary belongs to the most eutrophic aquatic ecosystems, in which the upper, middle and lower zones are distinguished, differing in hydrological, hydrochemical conditions and phytoplankton abundance. The data on hydrology (salinity, temperature), nutrients (nitrogen of nitrates) and chlorophyll *a* were analyzed for the period from March to August 2024. The upper zone of the estuary (lower part of the Pregolya River and the mouth) is characterized by a high content of nutrients (nitrate nitrogen) in the water, especially during the flood period, and relatively low abundance of phytoplankton (chlorophyll), the development of which is hindered by high flow rates. A sharp increase in phytoplankton abundance and a decrease in nitrogen occur in the middle zone of the estuary, especially during the warm season. Chlorophyll *a* concentrations in the middle zone corresponded to the “hyperbloom” of waters in May and August 2024, and on average, hypertrophic level was observed over the studied period. High values of chlorophyll *a* reflect favorable conditions for phytoplankton (supply of nutrients) and the possibility of creating a powerful biological filter in this estuary. Due to a sharp increase (by an order of magnitude) in the abundance of phytoplankton (water “hyperbloom”, chlorophyll *a* > 100 $\mu\text{g/l}$), rapid and almost complete extraction of nitrate nitrogen (reduction up to 100–1000 times) coming with river runoff is possible. Such significant changes occurred in May and August 2024 within a few kilometers of the transition from fresh to brackish water conditions (1–3 psu). In the lower zone of the estuary, the abundance of phytoplankton is significantly reduced due to the limitation of nutrients consumed in the middle zone. In the aspect of studying the “marginal filter” of estuaries, the spatial distribution of chlorophyll can reveal zones of formation of the biological filter and the most intensive removal of nutrients.

Seasonal variability in the biological filter is observed in the Pregolya Estuary, which affects the nutrient runoff into the Baltic Sea. In early spring, during the flood period, the seasonal succession of phytoplankton does not allow for the formation of a high abundance, and up to 2/3 of the nutrient runoff in nitrogen is used in the estuary, and the rest can contribute to the eutrophication of the Baltic Sea. During the warm period of low-water flow, a powerful biofilter is formed in the middle zone, where phytoplankton abundance grows to hypertrophic level and nitrate nitrogen is completely extracted from the water. As a result, the nutrient load from the estuary to the sea is significantly reduced, but there is strong biological pollution of the lagoon part of the estuary.

Keywords: chlorophyll, nitrogen, biological filter, algae bloom, Pregolya River, estuary, trophic state, Vistula Lagoon.

Acknowledgments: The results of the studies of hydrological conditions and chlorophyll were obtained within the grant of the Russian Science Foundation grant (No. 24-44-20027). The results of the studies of nutrients were obtained within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for I0 RAS (theme No. FMWE-2024-0025). The authors thanks A. V. Kilesko, D. A. Naidanov for their assistance in carrying out expeditionary work and hydrochemical analyses.

For citation: Aleksandrov S. V., Gorbunova Y. A., Dvoeglazova N. V. Transformation of nutrient runoff of mineral nitrogen by phytoplankton in the Pregolya Estuary. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(81):(680–698). doi: 10.33933/2713-3001-2025-81-680-698. (In Russ.).

Введение

Процессы, связанные с эвтрофированием и биопродуктивностью водных экосистем, достаточно хорошо изучены на примере внутренних водоемов. Эстуарии (дельты рек, лагуны) менее исследованы, но при этом они характеризуются уникальным сочетанием физических, химических и биологических показателей и имеют высокую первичную продуктивность [1]. Одной из актуальных проблем последних десятилетий является эвтрофикация прибрежных морских вод. Причина, в первую очередь, заключается в хозяйственной деятельности человека на суше [2, 3]. Речной сток выносит биогенные вещества, прежде всего азот и фосфор, в морские экосистемы, обуславливая значительные изменения в них. Эстуарии могут существенно влиять на поступление азота и фосфора с суши в морскую среду и снижать биогенную нагрузку на нее. В области смешения пресных и соленых вод наблюдаются сложные процессы, обуславливающие удержание неорганических и органических веществ, поступающих с речным стоком. Эффективность эстуариев в качестве естественного фильтра в большой степени зависит от их морфологических и функциональных характеристик, в частности от скорости водообмена [4—6].

А. П. Лисицын ввел понятие «маргинальный фильтр» и выделил физическую, физико-химическую и биологическую его части, принципиально обозначил местоположение зон изъятия из речного стока растворенных и нерастворенных веществ [7]. Он также указал, что маргинальный фильтр может выполнять функцию задержания загрязнений, и такая возможность рассмотрена на примере удержания нового вида загрязнения — микропластика [8]. Помимо седиментационных и сорбционных процессов в маргинальных фильтрах активно протекают биологические процессы (бионассимиляция, биофильтрация) [7]. В функционировании биологического фильтра, наряду с зоопланктонными и бентосными видами-фильтраторами, важную роль играет фитопланктон, который изымает растворенные неорганические биогенные вещества, при этом часть их удерживается и накапливается в эстуариях [6, 9]. Концентрация хлорофилла «а» в воде является показателем обилия (биомассы) фитопланктона, в том числе служит одним из ключевых индикаторов биопродуктивности и трофического статуса водных экосистем, включая эстуарии [10, 11]. Следовательно, оценка его величин и пространственного распределения может использоваться для характеристики биологического фильтра.

Река Преголя относится к средним рекам Балтийского моря, водосборный бассейн (13418 км^2) которой охватывает густонаселенную территорию Калининградской области и Варминско-Мазурского воеводства Польши, при этом биогенная нагрузка с водосбора составляет 5200 т N/год и 650 т P/год [12]. Река Преголя впадает в восточную часть Вислинского залива (Калининградский залив), обеспечивая $\sim 45\%$ материкового стока. Вислинский залив — одна из крупнейших солоноватоводных лагун Европы со средней глубиной 2,7 м, имеет свободный водообмен с морем через пролив [13]. Поступление через пролив морских вод ($17,0 \text{ км}^3/\text{год}$) в Вислинский залив многократно превышает материковый сток

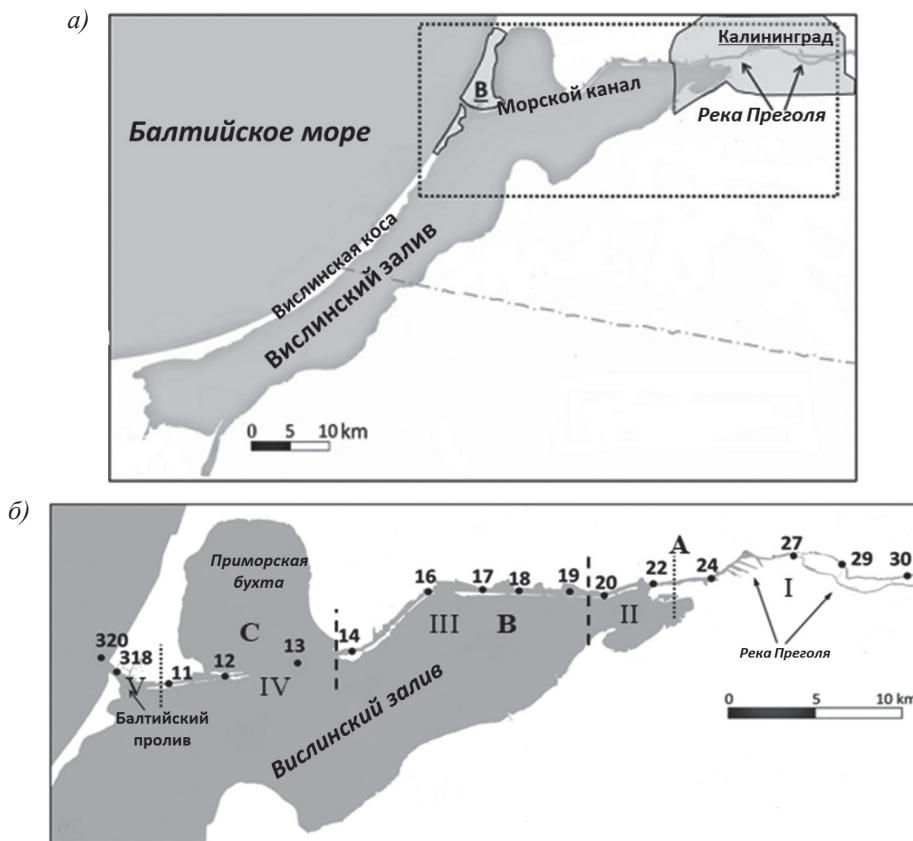


Рис. 1. Расположение района исследований (a) и схема станций отбора проб в эстуарии реки Преголя (б).

(A, B, C — верхняя, средняя, нижняя зоны; I—V — выделенные районы; пунктирные линии — условные границы зон; точечные линии — условные границы районов).

Fig. 1. Location of the study area (a) and scheme of sampling stations in the Pregolya Estuary (b).

(A, B, C — upper, middle, lower zones; I—V — proposed areas; dashed lines — conditional boundaries of zones; dotted lines — conditional boundaries of areas).

(3,6 км³/год) и объем самого залива (2,3 км³/год) [14, 15], в результате водоем имеет гидрологические признаки эстuarной системы [1, 13].

Устье р. Преголи связано с морским проливом глубоководным Калининградским морским каналом, который проходит вдоль северного берега Калининградского залива. Канал представляет гидротехническое сооружение, построенное в 1901 г., длиной 43 км, глубиной 9—12 м. На большей части своей длины канал отделен от залива насыпными дамбами, открытый участок канала длиной около 5 км имеется только в районе Приморской бухты (рис. 1). Пресноводный сток р. Преголи направляется в глубоководный канал и в акваторию залива, которые

являются соответственно глубоководной и мелководной частями эстуария реки Преголи [16].

Интенсивное перемешивание речных и морских вод (соленость 0—7 ‰) в эстуарии р. Преголи, включая морской канал и залив, определяет неоднородность распределения гидрологических, химических и биологических показателей [16—20]. По распределению взвешенных веществ и ряда металлов в нем показано формирование маргинального фильтра [21]. Калининградский залив, составляющий центральную часть эстуария р. Преголи, характеризуется увеличением обилия и продуктивности фитопланктона до гипертрофного состояния в период летнего «цветения» вод [22]. Многолетние гидрологические исследования проводятся в заливе, морском проливе, морском канале и нижнем течении р. Преголи с 1990-х гг. [16, 23], а гидробиологические исследования до последнего времени выполнялись в основном в лагуне (Вислинский залив), практически не затрагивая речную часть и морской пролив, а также акваторию морского канала. Важным аспектом работ в 2024 г. было получение данных для нижнего течения р. Преголи и морского пролива, что позволило целостно рассмотреть всю эстуарную систему.

Целью работы является рассмотрение роли эстуарной системы р. Преголи как биологического фильтра, который трансформирует биогенный сток и снижает биогенную нагрузку на Балтийское море, но одновременно способствует «цветению» вод в лагуне (Вислинском заливе).

Материалы и методы

Изучение эстуария р. Преголи проведено на 16 станциях, что позволило получить данные о пространственном распределении показателей от нижнего течения реки до морского пролива (рис. 1). Отбор проб выполнялся в 2024 г. в период весеннего половодья (26 марта, 9 апреля) и последующий период межени (13 мая, 2 августа). На каждой станции температуру и соленость воды определяли одним из гидрофизических зондов Sontek CastAway-CTD, Sea&Sun CTD90M, Idronaut Ocean Seven 316Plus Multiparameter Probe. Пробы воды отбирали в поверхностном слое (0—1 м) батометром Нискина (объем — 5 л). Пробы хлорофилла фильтровали через фильтры МФАС-МА-6 (диаметр пор — 0,3 мкм) и определяли оптические плотности на спектрофотометре СФ-56 на основе методики и уравнений [24]. Концентрацию азота нитратного (N-NO_3) определяли с использованием спектрофотометра КФК-3 [25].

Результаты и обсуждение

Пространственное деление эстуария реки Преголи с учетом гидрологических условий

Для эстуария р. Преголи отсутствует установившееся деление акватории с учетом морфометрических и гидрологических характеристик. В ряде работ такое районирование применяется только для лагунной акватории (Вислинского залива), которая является лишь частью эстуария [26—28]. При анализе пространственной

изменчивости предложено условное деление эстуария р. Преголи на три основные зоны (верхняя, средняя, нижняя) в соответствии со схемой, используемой для эстуариев [29]. Для более детальной характеристики пространственной изменчивости гидрологических, гидрохимических и биологических условий в пределах этих зон было дополнительно выделено 5 районов (I—V) (рис. 1).

А) «Верхняя зона» включает нижнее течение и устье р. Преголи с преимущественно пресноводными условиями. В пределах нее было выделено 2 района:

I — нижнее течение р. Преголи с узким руслом (< 100 м), расположеннное преимущественно в пределах г. Калининграда (станции 24—30). Поверхностный слой с пресноводными условиями. Соленость воды была 0,2—0,3 пес и только в межень (май, август 2024 г.) незначительно увеличивалась ближе к устью (станция 24) до 0,7—1,1 пес (рис. 2 а).

II — устье в районе впадения реки в лагуну (Калининградский залив) (станции 20—22) с выраженным влиянием речных вод р. Преголи. В период половодья (март, апрель) наблюдаются пресноводные условия (0,4—0,6 пес), в межень отмечается небольшой рост солености до 0,9 пес в мае и 1,8 пес в августе.

В) «Средняя зона» расположена в восточной части лагуны (Калининградском заливе), включая отделенный дамбами участок Калининградского морского

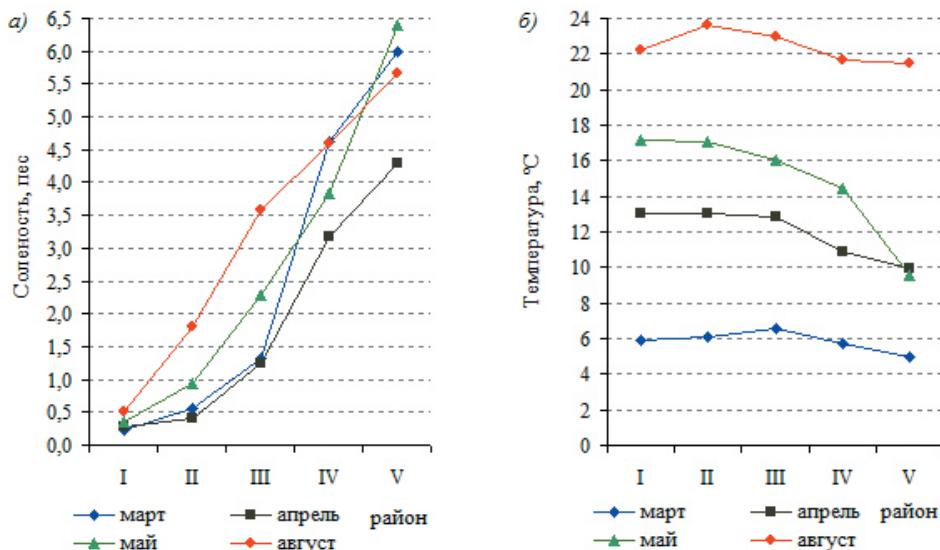


Рис. 2. Средние для районов значения солености воды (а) и температуры воды (б) в поверхностном слое.

(I — нижнее течение реки, II — устье, III — восточный район, IV — западный район, V — район морского пролива).

Fig. 2. Average for areas values of water salinity (a) and water temperature (b) in the surface layer.

(I — the lower part of the river, II — the mouth, III — eastern area, IV — western area, V — sea strait).

канала (станции 14—19), которая отнесена к району III (восточный район). На этот район значительное влияние оказывает поступление речных вод в период половодья, когда соленость около 1 пес (1,2—1,3 пес в марте и апреле 2024 г.), в период межени поступление морских вод по морскому каналу ведет к осолонению до 2,3 пес в мае и 3,6 пес в августе. В этом районе в целом наблюдается переход к лимническим условиям, характерным для лагун.

С «Нижняя зона» включает западную часть лагуны и район морского пролива, через который происходит свободный водообмен с Балтийским морем, в ней выделяется 2 района.

IV — западный район расположен в открытой неглубокой (3—5 м) акватории лагуны (станции 11—13), где происходит смешение речных, лагунных и морских вод. Внутригодовые изменения речного стока сказываются меньше, и солоноватоводные условия достаточно стабильные (3,2—4,6 пес с марта по август 2024 г.) (рис. 2 а).

V — район морского пролива (станции 318, 320) соединяет лагуну с прибрежной зоной моря. В него активно поступают солоноватоводные воды Балтийского моря, и наблюдается максимальная соленость воды в эстуарии Преголи — 5,7—6,4 пес, которая может уменьшаться в период половодья и сгонных восточных ветров (до 4,3 пес в апреле 2024 г.).

Гидрологические условия

Для р. Преголи характерна значительная внутригодовая изменчивость стока. Наибольший расход воды (период половодья) наблюдается с февраля до начала апреля, а минимальный (межени) с мая по октябрь [30], что значительно влияет на сезонную изменчивость солености в эстуарии. Согласно данным Калининградского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (КЦГМС), в 2024 г. наибольший сток р. Преголи отмечен в феврале, когда водность рек была выше среднемноголетней [20, 31]. В последующие месяцы (март, апрель) в р. Преголя был среднемноголетний уровень. В период половодья в марте и апреле 2024 г. в устье реки были пресные речные воды (0,4—0,6 пес), а в средней зоне эстуария (восточный район) происходило опреснение (около 1 пес) под влиянием речного стока (рис. 2 а). В межень речной сток снижался и находился в мае и августе 2024 г. на среднемноголетнем уровне. В мае влияние речных вод (соленость около 1 пес) сохранялось в устье, но в средней зоне эстуария оно снижалось, и соленость увеличивалась в диапазоне 1,3—3,4 пес. Наибольшее осолонение вод устья (1—2 пес) и средней зоны (3—4 пес) было в августе в период минимального стока р. Преголи и распространения солоноватых вод лагуны.

Температура воздуха в 2024 г. была выше среднемноголетнего уровня на 1—4 °C в отдельные месяцы на протяжении всего года [31]. В частности, в марте она была выше на 3 °C, в мае — на 3—4 °C по данным КЦГМС. Температура воды в эстуарии р. Преголя в конце зимнего гидрологического периода (март) характеризовалась однородным прогревом поверхностного слоя (около 6 °C) (рис. 2 б). В апреле с весенним прогревом она увеличивалась до 12—13 °C в верхней и

средней зоне эстуария и до 10 °С в нижней зоне. В мае с учетом высоких среднемесячных температур воздуха вода в эстуарии Преголи прогрелась до 14—17 °С и только у морского пролива температура была ниже (10 °С) под влиянием морских вод (соленость увеличивалась с 4 до 6 пес). В августе, который в Калининградской области был теплым и самым засушливым месяцем лета 2024 г., наблюдался максимальный годовой прогрев воды до 22—23 °С на всей акватории эстуария Преголи. Наблюдаемое в 2024 г. распределение гидрологических условий в целом соответствует описанным ранее закономерностям [18, 27, 28]. Повышенный прогрев воздуха и воды в 2024 г. отражает усиливающуюся тенденцию роста температур (0,4 °С/ 10 лет), в частности весной и летом, на акватории и в прибрежных районах Балтийского моря, включая юго-западные районы Северо-Западного Федерального округа [33—35]. Следствием этого может быть влияние на гидрохимические и биологические процессы в водных экосистемах, в частности способствующих формированию «цветений» воды.

Азот нитратов и хлорофилл

Основным гидрохимическим источником эвтрофирования водоемов служат высокие концентрации фосфора и азота [2, 3, 5]. Азот нитратов является основной формой поступления минерального азота в водные экосистемы с речным стоком. Его содержание отражает сезонную изменчивость поступления биогенных веществ в эстуарий р. Преголи и их последующее использование биологическими сообществами, прежде всего фитопланктоном. Концентрации азота нитратов в воде эстуария р. Преголи в 2024 г. имели выраженную пространственную и сезонную изменчивость.

В период половодья в марте—апреле наблюдались наибольшие концентрации азота нитратов, особенно в верхней зоне эстуария (нижнее течение р. Преголи и ее устье — 1000—1400 мкгN/л), заполненной пресными водами (районы I, II) (рис. 3 а). В этот период происходит интенсивное поступление азота с водосборной территории после зимнего накопления. Развитие фитопланктона в реке и устье было относительно слабым (хлорофилл «а» в среднем — 7—13 мкг/л) (рис. 3 б). В средней зоне эстуария (район III) обилие ранневесеннего фитопланктона существенно увеличивалось (в среднем до 31—34 мкг/л, максимально 60—67 мкг/л), что вело к росту потребления азота нитратов водорослями и снижению его концентраций в 2—3 раза (до уровня 500—600 мкгN/л на границе с нижней зоной эстуария). В нижней зоне эстуария (район IV) обилие фитопланктона снижалось (в среднем до 17—20 мкг/л), вероятно, из-за неблагоприятного влияния осолонения при поступлении морских вод, также ведущего к разбавлению вод эстуария и снижению концентрации биогенных веществ. В частности, в марте между станциями 13 и 12 с увеличением солености с 2,3 до 5,6 пес, содержание хлорофилла и азота нитратов снижалось в 2 и 2,5 раза (до 13 мкг/л и 260 мкгN/л).

Несмотря на значительное снижение концентраций азота нитратов из-за его потребления фитопланктоном в средней зоне эстуария и дополнительного разбавления морскими водами в нижней зоне, его значительная часть — 390—440 мкгN/л

(40 % в марте и 30 % в апреле от исходных величин в речной воде) достигала морского пролива (район V). Поступление азота из эстуария р. Преголи в таком количестве способствует эвтрофированию Балтийского моря. Согласно многолетним данным в прибрежной зоне моря у Калининградского полуострова весной концентрации биогенных элементов на порядок ниже (~40 мкгN/л азота нитратов и 65 мкгN/л минерального азота) [32].

В межень в теплый период года сток р. Преголи снижался с одновременным уменьшением концентрации азота нитратов в нижнем течении и устье до ~500 мкгN/л в мае и ~300 мкгN/л в августе 2024 г. В верхней зоне эстуария обилие фитопланктона оставалось на низком уровне как в марте-апреле (хлорофилл «а» в среднем 11 мкг/л) (рис. 3). Повышенная проточность в р. Преголе, по сравнению с нижележащей лагунной частью, вероятно угнетающее действовала на фитопланктон, в результате он не использовал высокие концентрации биогенных элементов речного стока.

Резкое увеличение обилия фитопланктона происходило на границе верхней и средней зон эстуария. При переходе от лотических к лимническим условиям в средней зоне складывались оптимальные гидрологические условия для фитопланктона (снижение проточности, при сохранении низкой солености).

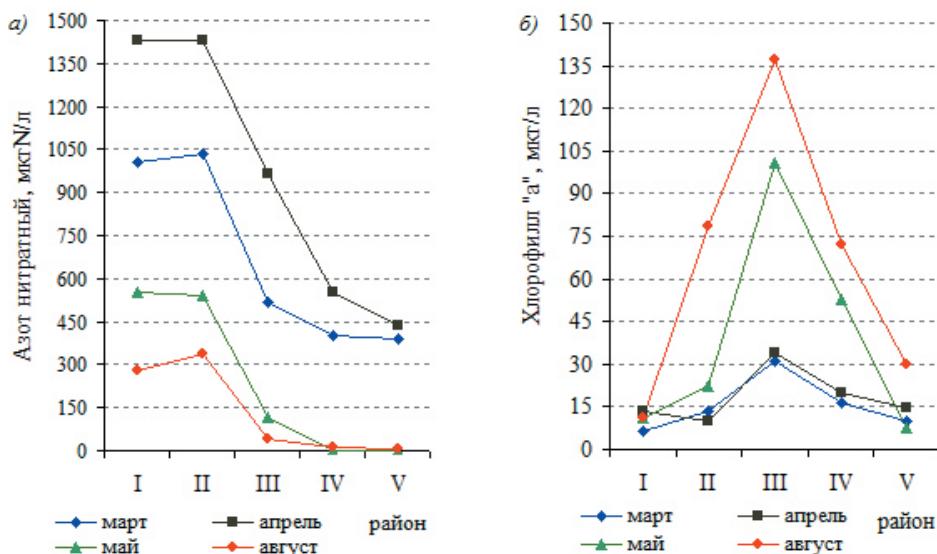


Рис. 3. Средние для районов концентрации азота нитратного (а) и хлорофилла (б) в поверхностном слое.

(I — нижнее течение реки, II — устье, III — восточный район, IV — западный район, V — район морского пролива).

Fig. 3. Average for areas values of concentrations of nitrate nitrogen (a) and chlorophyll (b) in the surface layer.

(I — the lower part of the river, II — the mouth, III — eastern area, IV — western area, V — sea strait).

В результате в этой зоне происходило интенсивное весеннеев развитие фитопланктона (концентрации хлорофилла «а» 70—130 мкг/л) и особенно масштабное летнее «гиперцветение» воды (70—180 мкг/л). Как следствие, в средней зоне (район III) формировался мощный биологический фильтр: быстрое извлечение биогенных элементов и одновременно массовое развитие фитопланктона (рис. 3). В частности, в мае 2024 г. в центре средней зоны в пределах 2 км (между станциями 17 и 18) концентрация азота нитратов снижалась с 450 до 3 мкгN/л при резком росте обилия фитопланктона (хлорофилл «а» увеличивался с 70 до 130 мкг/л). В августе на границе верхней и средней зон эстуария (между станциями 19 и 22) концентрация азота нитратного снижалась с 500 до 20 мкгN/л, а хлорофилл «а» увеличивался с 40 до 180 мкг/л. В оба месяца такие изменения происходили в зоне перехода от пресных к солоноватоводным условиям (от 1,3 до 2,5 пес.).

В нижней зоне, расположенной в западной части Калининградского залива (район IV), концентрации азота нитратов в мае были около аналитического нуля, а в августе — всего 10 мкгN/л, чему способствовало высокое обилие фитопланктона, потребляющего азот. Сезонная динамика азота нитратов в средней и нижней зоне эстуария р. Преголи в 2024 г. соответствовала ранее установленной для Калининградского залива: открытая акватория лагуны характеризовалась максимальными величинами в марте—апреле (200—1000 мкгN/л) и минимумом с мая по август (< 10 мкгN/л), и значительным снижением концентраций от восточного района, куда поступает сток р. Преголи, до района у морского пролива [27, 28].

Из-за активного использования азота в эстуарии р. Преголи в теплый период (май — август) концентрации азота нитратов в районе морского пролива были очень низкими (1—7 мкгN/л). Они сопоставимы с летним уровнем в прибрежной зоне моря (~10 мкгN/л, согласно [32]) и не оказывают эвтрофирующего влияния на Балтийское море.

«Цветение» воды и трофическое состояние в разных зонах эстуария

Обилие фитопланктона, оцениваемое по концентрации хлорофилла «а», в эстуарии р. Преголи имело значительную пространственную изменчивость, связанную с влиянием гидрологических условий и содержанием биогенных элементов.

Наименьшие величины хлорофилла «а» были в верхней зоне эстуария (нижнее течение р. Преголи). Несмотря на высокие концентрации биогенных элементов весь период наблюдений (март—август) и широкий диапазон температуры воды (6—22 °C) здесь стабильно сохранялось слабое развитие фитопланктона (хлорофилл «а» в диапазоне 5—16, в среднем для отдельных месяцев 7—13 мкг/л) (рис. 3 б), соответствующее пограничному состоянию между мезотрофными и эвтрофными водами [10]. Значимым фактором, препятствующим интенсивному развитию фитопланктона в этой зоне, вероятно, является высокая проточность, которая может оказывать как прямое механическое воздействие на фитопланктон, в том числе на цианобактерий, так и изменять физические и химические условия его обитания [36].

Резкое увеличение обилия фитопланктона происходило в средней зоне эстуария. Даже в период половодья в марте и апреле концентрации хлорофилла «а» на отдельных участках могли достигать 60—67 мкг/л. Значительное увеличение обилия фитопланктона происходило в период межени (май, август). В мае 2025 г. впервые за многолетний период исследований Калининградского залива концентрации хлорофилла «а» были выше 100 мкг/л (до 113—132 мкг/л), что классифицируется как «гиперцветение» вод. Ранее такие величины наблюдались только летом в гипертрофных водоемах, в частности в Куршском заливе, тогда как в Калининградском заливе в мае они были в среднем в 3—5 раз ниже (20—30 мкг/л) [22, 37]. Летом 2024 г. хлорофилл «а» достигал максимальных величин (до 140—180, в среднем 137 мкг/л) (рис. 3 б). Такое интенсивное развитие фитопланктона в этой зоне эстуария летом обусловлено доминированием цианобактерий (*Woronichinia compacta*, *Microcystis aeruginosa*), которые сменяют доминирующие в речной части диатомовые водоросли (*Melosira varians*, *Skeletonema subsalsum*, *Stephanodiscus hantzschii*) и многократно увеличивают биомассу фитопланктона [19]. Измеренные летом 2024 г. концентрации хлорофилла «а» соответствовали максимальным величинам, которые могут наблюдаться в пресных и солоноватоводных водных экосистемах при массовом развитии цианобактерий («гиперцветение» воды). Ранее в северной и центральной частях Вислинского залива (российская зона, Калининградский залив) величины хлорофилла «а» были значительно ниже (в среднем до 50 мкг/л) [22]. Только в более закрытой и эвтрофированной южной части Вислинского залива (польская зона), куда поступает часть стока р. Висла и наблюдается интенсивное «цветение» вод, концентрации хлорофилла «а» периодически превышали 100 мкг/л [38, 39].

Интенсивное «цветение» воды летом 2024 г. дополнительно было связано с максимальным прогревом вод в эстуарии, достигшем в августе 23 °С при среднемесячной температуре воздуха на 1—1,5 °С выше среднемноголетних величин [31]. Такая температура (> 20—22 °С) оптимальна для роста цианобактерий [40] и в целом многолетняя тенденция увеличения прогрева в акватории и прибрежных районах Балтийского моря [33] может стимулировать «цветение» воды.

Очень интенсивное развитие фитопланктона сохранялось на всем протяжении средней зоны эстуария, составляя в мае и августе 2024 г. в среднем 101 и 137 мкг/л. Для всего периода с марта по август 2024 г. содержание хлорофилла «а» было 76 мкг/л, что втрое выше, чем условная граница (25 мкг/л) для гипертрофных водных экосистем [10]. Это характеризует чрезвычайно высокий уровень обилия фитопланктона и продуктивности вод, создаваемый в средней зоне эстуария благодаря биогенным веществам, поступающим с речным стоком.

В нижней зоне, в пределах западной части лагуны (район IV), обилие фитопланктона в мае и августе снижалось в 2 раза (хлорофилл «а» в среднем 50 и 70 мкг/л, максимально до 85 мкг/л) (рис. 3 б) вследствие лимитирования по биогенным элементам, потребленным в средней зоне эстуария. Сохранению высоких концентраций хлорофилла «а» в этой зоне на уровне «цветения» вод способствует интенсивная вегетация азотфикссирующих цианобактерий [38, 41], массовое развитие которых возможно при дефиците азота при высокой температуре

воды ($> 20—22^{\circ}\text{C}$) [42]. Также в этот район дополнительно поступает фитопланктон из средней зоны эстуария. Для всего периода с марта по август 2024 г. содержание хлорофилла «а» в западной части лагуны составило 40 мкг/л, что достигает гипертрофного уровня [10]. Концентрации хлорофилла «а» в нижней зоне эстуария р. Преголи в целом соответствовали обилию фитопланктона (хлорофилл «а» 35—45 мкг/л) Вислинского залива согласно многолетним данным [39, 43].

Значительная часть органического вещества фитопланктона, образующегося в средней и нижней зонах эстуария р. Преголи, впоследствии аккумулируется на дне, формируя илистые отложения, занимающие значительную часть Вислинского залива [44]. Высокое содержание биогенных элементов в них создает условия для многолетнего высокого уровня эвтрофирования и первичной продуктивности вод в лагунной экосистеме [22, 39, 43].

Биологический фильтр в эстуарии

В связи со сложностью структуры и большим разнообразием условий, эстуарии значительно различаются по обилию фитопланктона (хлорофиллу «а») и его сезонной динамике [11]. В большинстве эстуарных систем максимальные концентрации хлорофилла «а» не превышают 40—50 мкг/л [45], что в целом соответствует эвтрофному уровню продуктивности вод (максимальные величины 25—75 мкг/л) согласно трофической классификации [10]. Только в единичных из них (например, залив Тампа, фьорд Рингкёбинг), получающих большую биогенную нагрузку и относящихся к лагунному типу, максимальные концентрации хлорофилла «а» периодически были выше 100 мкг/л [11], соответствующая гипертрофному уровню. Обилие фитопланктона (хлорофилла «а») в эстуарии р. Преголи в период «цветения» воды превышало 100 мкг/л, что относит его к наиболее высокоэвтрофным водоемам мира.

Несмотря на широкий диапазон изменчивости, общей чертой многих эстуариев является наличие устойчивого максимума хлорофилла в верхней или средней, преимущественно пресноводной зоне [45, 46]. Интенсивное развитие фитопланктона характерно для зон уменьшения концентраций неорганических форм азота и фосфора, так как их потребление фитопланкtonом является основным процессом удаления биогенных веществ из воды в эстуариях [47].

В период половодья (март—апрель) в эстуарий р. Преголи поступает наибольшее количество биогенных элементов, и сезонная сукцессия фитопланктона не позволяет формировать высокое обилие (концентрации хлорофилла в 3—4 раза ниже, чем в мае—августе), в результате значительное количество биогенных элементов (30—40 % азота нитратов) проходит через эстуарий р. Преголи. В воде, поступающей из эстуария в море через морской пролив, концентрации азота нитратов на порядок выше, чем в море, и могут оказывать существенное влияние на эвтрофирование прибрежной зоны Балтийского моря.

Напротив, резкое увеличение (на порядок) обилия фитопланктона (хлорофилл «а» > 100 мкг/л, «гиперцветение» вод) в опресненной средней части эстуария

р. Преголи в мае и августе 2024 г. и одновременное резкое снижение концентраций азота нитратов (до 100—1000 раз) свидетельствует о формировании мощного биофильтра в эстuarной зоне в теплый период года. Поступающий с речным биогенным стоком азот нитратов почти полностью потребляется в эстуарии р. Преголи. Его концентрации, выносимые эстuarными водами через морской пролив, не оказывают эвтрофирующего влияния на Балтийское море в этот период. Одновременно с этим использование азота нитратов фитопланктоном в эстуарии с формированием мощных «цветений» воды в его средней зоне ведет к увеличению эвтрофирования в лагуне (Вислинском заливе). В частности, могут формироваться неблагоприятные последствия «гиперцветений» цианобактерий (накопление токсинов, замор рыб), а образование на дне илистых отложений создает условия для сохранения многолетнего высокого уровня эвтрофирования вод.

Заключение

Эстуарий р. Преголи относится к наиболее эвтрофным водным экосистемам, для которого характерна значительная пространственная и сезонная изменчивость гидрологических, гидрохимических условий и обилия фитопланктона. Верхняя зона эстуария (нижнее течение реки и устье) характеризовалась высоким содержанием в воде биогенных элементов (азота нитратов), особенно в период половодья, и относительно низким обилием фитопланктона (хлорофилла), развитию которого, вероятно, препятствует высокая проточность. Резкое увеличение обилия фитопланктона происходило в средней зоне эстуария, особенно в теплый период года. Летом 2024 г. при массовом развитии цианобактерий («гиперцветении» воды) концентрации хлорофилла «а» соответствовали максимальным величинам для пресных и солоноватоводных экосистем. Высокие величины хлорофилла «а» отражают благоприятные условия для фитопланктона (обеспеченность биогенными элементами) и возможность создания мощного биологического фильтра в данном эстуарии.

В биологическом фильтре в эстуарии р. Преголи происходит быстрое и почти полное извлечение азота нитратов (снижение до 100—1000 раз), поступающего с речным стоком, благодаря резкому росту (на порядок) обилия фитопланктона («гиперцветение» вод, хлорофилл «а» > 100 мкг/л). В нижней зоне эстуария обилие фитопланктона значительно снижается из-за лимитирования по биогенным элементам, потребленным в средней зоне. В аспекте изучения «маргинального фильтра» эстуариев пространственное распределение хлорофилла позволяет выявлять зоны формирования биологического фильтра и наиболее интенсивного изъятия биогенных веществ.

В эстуарии р. Преголи наблюдается сезонная изменчивость действия биологического фильтра, что влияет на биогенный сток в Балтийское море. Ранней весной в период половодья сезонная сукцессия фитопланктона не позволяет формировать высокое обилие, и в эстуарии используется до 2/3 биогенного речного стока по азоту, а остальная часть поступает в Балтийское море, что может способствовать эвтрофированию ее прибрежной зоны. В теплый период в межень формируется мощный биофильтр, в котором фитопланктон развивается до гипертрофного

уровня, и азот нитратов полностью извлекается. Это значительно снижает биогенную нагрузку на море, но происходит увеличение эвтрофирования средней (лажунной) зоны эстуария.

Список литературы

1. McLusky D. S., Elliott M. The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management. Oxford University Press, 2004. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001.
2. Nixon S. W. Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns // *Ophelia*. 1995. V. 41. P. 199—219. doi: 10.1080/00785236.1995.10422044.
3. Cloern J. Our Evolving Conceptual Model of the Coastal Eutrophication Problem // *Marine Ecology Progress Series*. 2001. V. 210. P. 223—253. doi: 10.3354/meps210223.
4. Nixon S. W., Ammerman J. W., Atkinson L. P. et al. The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the North Atlantic Ocean // *Biogeochemistry*. 1996. V. 35. P. 141—180. doi: 10.1007/BF02179826.
5. Nedwell D. B., Jickells, T. D., Trimmer M. et al. Nutrients in estuaries // *Advances in Ecological Research*. 1999. V. 29. P. 43—92. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60191-9.
6. Conley D. J., Kaas H., Møhlenberg F. et al. Characteristics of Danish estuaries // *Estuaries and Coasts*. 2000. V. 23(6). P. 820—837. doi: 10.2307/1353000.
7. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов. *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735—747.
8. Chubarenko I., Khatmullina L., Esiukova E. et al. Deposition of microplastics in estuaries: critical review of field and experimental data from the perspective of the Ocean Marginal Filter concept // *Science of the Total Environment*. 2025. V. 997. P. 180210. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180210.
9. Arndt S., Lacroix G., Gypens N. et al. Nutrient dynamics and phytoplankton development along an estuary-coastal zone continuum: A model study // *Journal of Marine Systems*. 2011. V. 84, No. 3—4. P. 49—66. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.08.005.
10. OECD: Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris, 1982. 154 p.
11. Cloern J. E., Jassby A. D. Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine-coastal Ecosystems // *Estuaries and Coasts*. 2010. V. 33, No. 2. P. 230—241. doi: 10.1007/s12237-009-9195-3.
12. Chubarenko B., Gorbunova J., Dominin D. Scenario analysis of socio-economic and climate related changes in nutrient load and retention for the Pregolya River catchment (South-Eastern Baltic): The view at the beginning of 21st century // *Fundamental and Applied Hydrophysics* 2024. V. 17, No. 2. P. 35—49. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-4.
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // *Ecology of Baltic coastal waters*. / U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008. P. 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Силич М. В. Водный баланс залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. С. 143—172.
15. Cieslinski R., Chlost I. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea // *Baltica*. 2017. V. 30. No. 2. P. 107—117. doi: 10.5200/baltica.2017.30.12.
16. Chubarenko B., Dominin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). In: The diversity of russian estuaries and lagoons exposed to human influence. *Estuaries of the World*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
17. Krechik V., Krek A., Bubnova E., Kapustina M. Mixing zones within the complex transitional waters of the Baltic Sea Vistula Lagoon // *Regional Studies in Marine Science*. 2020. V. 34. P. 101023. doi: 10.1016/j.rsma.2019.101023.
18. Krobchenkova K. D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S., Stont Zh. I., Ulyanova M. O. Influence of hydro-meteorological conditions on the plankton distribution in the estuary of the Pregol river and the coastal part of the Baltic Sea // *Oceanology*. 2023. V. 63, No. S1. P. S188—S201. doi: 10.1134/S0001437023070068.
19. Семенова А. С., Дмитриева О. А. Планктонные сообщества системы «река Преголя — Вислинский залив — Калининградский морской канал (КМК) — Балтийское море» // Труды Зоологического института РАН. 2023. Т. 327б. № 3. С. 430—450. doi: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.430.

20. Бирюкова А. Д., Муратова А. А., Ульянова М. О. Анализ изменчивости параметров карбонатной системы в зоне смешения речных, заливных и морских вод (на примере юго-восточной части Балтийского моря) // Успехи современного естествознания. 2025. № 7. С. 8—19. doi: 10.17513/use.38406.
21. Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuvitkin A. A. et al. Geochemistry of suspended particulate matter in the marginal filter of the Pregolya River (Baltic Sea) // Oceanology. 2018. V. 58, No. 6. P. 856—869. doi: 10.1134/S0001437018060097.
22. Aleksandrov S. V. Long-term changes in the primary production of phytoplankton in the ecosystem of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea // Inland Water Biology. 2024. V. 17, No. 1. P. 37—47. doi: 10.1134/S1995082924010036.
23. Чубаренко Б. В., Двоеглазова Н. В., Боскакёв Р. В. и др. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик в зоне смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) и методические подходы к ее изучению // Океанологические исследования. 2024. Т. 52, № 1. С. 157—176. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8.
24. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c₁ and c₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. V. 167, Issue 2. P. 191—194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
25. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. Москва: ВНИРО, 2003. 202 с.
26. Чубаренко Б. В. Зонирование Калининградского залива и устьевого участка реки Преголи по показателям гидролого-экологического состояния и в целях оптимизации мониторинга / Комплексное исследование процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. Вып. 2, Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2007. С. 591—601.
27. Александров С. В. Пространственные изменения гидрохимических показателей в Вислинском заливе в 2014—2016 годах // Труды АтлантНИРО. 2018. Т. 2, № 1. С. 5—21.
28. Сташко А. В., Александров С. В. Пространственное распределение и сезонная динамика гидрохимических условий в Вислинском заливе Балтийского моря в 2020—2022 гг. // Океанологические исследования. Т. 51. № 1. С. 71—90. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4.
29. Fairbridge R. W. The estuary: its definition and geodynamic cycle // Chemistry and Biochemistry of Estuaries. John Wiley, New York, 1980. P. 1—35.
30. Domnin D., Chubarenko B., Capell R. Formation and re-distribution of the river runoff in the catchment of the Pregolya River // The Handbook of Environmental Chemistry. 2018. V. 65: 269—284. doi: 10.1007/698_2017_97.
31. Гидрометеорологическая обстановка по Калининградской области. Калининградский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС». 2024. URL: <https://meteo39.ru/news.html>.
32. Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V. Hydrological and hydrochemical underpinnings of primary production and division of the Russian sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea // Oceanology. V. 59, No. 1. P. 49—65. doi: 10.1134/S0001437019010077.
33. Бойцов В. Д. Долгопериодная изменчивость температуры поверхности Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 236—254. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-236-254.
34. Груздев А. И., Лобанов В. А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха в Северо-Западном Федеральном округе // Гидрометеорология и экология. 2025. № 79. С. 307—323. doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323.
35. Шишкина Т. Р., Ефимова Ю. В., Лаврова И. В., Иванова И. А., Иванова Е. П. Формирование аномального термического режима осенью и весной на Европейской территории России // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 57—72. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72.
36. Рахуба А. В. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2020. Т. 162, № 3. С. 430—444. doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444.
37. Александров С. В., Горбунова Ю. А. Продукция фитопланктона и содержание хлорофилла в эстуариях различного типа // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2012. № 1. С. 90—98.

38. Kownacka J., Całkiewicz J., Korniów R. A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century // *Oceanologia*. 2020. V. 62, No. 4. P. 538—555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004.
39. Nawrocka L., Kobos J. The trophic state of the Vistula Lagoon: an assessment based on selected biotic and abiotic parameters according to the Water Framework Directive // *Oceanologia*. 2011. V. 53, No. 3. P. 881—894. doi: 10.5697/oc.53-3.881.
40. Whittton B. Freshwater plankton // *The biology of blue-green algae*. 1973. V. 9. P. 353—367.
41. Kruk M., Jaworska B., Jabłomska-Barna I. et al. How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? // *Oceanology*. 2016. V. 58, No. 4. P. 341—352. doi: 10.1016/j.oceano.2016.05.004.
42. Waughman G. The effect of temperature on nitrogenase activity // *Journal of Experimental Botany*. 1977. V. 28, No. 105: 949—8960. doi: 10.1093/jxb/28.4.949.
43. Александров С. В., Сташко А. В. Экологическое состояние Вислинского залива с учетом параметров качества и эвтрофирования вод // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2023. № 3. С. 78—91. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6.
44. Чечко В. А., Топчая В. Ю., Бабаков А. Н. Новая карта донных осадков Калининградского залива Балтийского моря // Известия КГТУ. 2023. № 69. С. 44—56. doi: 10.46845/1997-3071-2023-69-44-56.
45. Underwood G. J. C., Kromkamp J. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries // *Advances in Ecological Research*. 1999. V. 29. P. 93—153. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60192-0.
46. Le Y., Zhao Y., Liu X. et al. Distribution characteristics and influencing factors of chlorophyll a in the Pearl River Estuary and surrounding waters during spring and summer of 2023 // *Regional Studies in Marine Science*. 2025. V. 87. P. 104241. doi: 10.1016/j.rsma.2025.104241.
47. Fisher T. R., Harding Jr. L. W., Stanley D. W. et al. Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1988. V. 27, No. 1. P. 61—93. doi: 10.1016/0272-7714(88)90032-7.

References

1. McLusky D. S., Elliott M. The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management. Oxford University Press. 2004. doi 10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001.
2. Nixon S. W. Coastal Marine Eutrophication: A Definition, Social Causes, and Future Concerns. *Ophelia*. 1995; 41: 199—219. doi: 10.1080/00785236.1995.10422044.
3. Cloern J. Our Evolving Conceptual Model of the Coastal Eutrophication Problem. *Marine Ecology Progress Series*. 2001; 210: 223—253. doi: 10.3354/meps210223.
4. Nixon S. W., Ammerman J. W., Atkinson L. P. et al. The fate of nitrogen and phosphorus at the land sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*. 1996; 35: 141—180. doi: 10.1007/BF02179826.
5. Nedwell D. B., Jickells, T. D., Trimmer M. et al. Nutrients in estuaries. *Advances in Ecological Research*. 1999; 29: 43—92. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60191-9.
6. Conley D. J., Kaas H., Møhlenberg F. et al. Characteristics of Danish estuaries. *Estuaries and Coasts*. 2000; 23(6): 820—837. doi: 10.2307/1353000.
7. Lisitsyn A. P. Marginal filter of the oceans. *Okeanologiya = Oceanology*. 1994; 34(5): 735—747. (In Russ.).
8. Chubarenko I., Khatmullina L., Esiukova E. et al. Deposition of microplastics in estuaries: critical review of field and experimental data from the perspective of the Ocean Marginal Filter concept. *Science of the Total Environment*. 2025; 997: 180210. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180210.
9. Arndt S., Lacroix G., Gypens N., et al. Nutrient dynamics and phytoplankton development along an estuary—coastal zone continuum: A model study. *Journal of Marine Systems*. 2011; 84(3—4): 49—66. doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.08.005.
10. OECD: Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris, 1982: 154 p.
11. Cloern J. E., Jassby A. D. Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine-coastal Ecosystems. *Estuaries and Coasts*. 2010; 33(2): 230—241. doi: 10.1007/s12237-009-9195-3.

12. Chubarenko B., Gorbunova J., Domnin D. Scenario analysis of socio-economic and climate related changes in nutrient load and retention for the Pregolya River catchment (South-Eastern Baltic): The view at the beginning of 21st century. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024; 17(2): 35—49. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-4.
13. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon. Ecology of Baltic coastal waters. U. Schiewer (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. 2008; 167—195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.
14. Silich M. V. Water balance of the lagoon. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva = Hydrometeorological regime of the Vistula Lagoon*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: (143—172). (In Russ.).
15. Ciesliski R., Chlost I. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea. *Baltica*. 2017; 30(2): 107—117. doi: 10.5200/baltica.2017.30.12.
16. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary lagoons of the Baltic Sea (Chapter 6). In: The diversity of russian estuaries and lagoons exposed to human influence. *Estuaries of the World*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 149—191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.
17. Krechik V., Krek A., Bubnova E., Kapustina M. Mixing zones within the complex transitional waters of the Baltic Sea Vistula Lagoon. *Regional Studies in Marine Science*. 2020; 34: 101023. doi: 10.1016/j.rsma.2019.101023.
18. Korobchenkova K. D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S., Stont Zh. I., Ulyanova M. O. Influence of hydro-meteorological conditions on the plankton distribution in the estuary of the Pregol river and the coastal part of the Baltic Sea. *Oceanology*. 2023; 63(S1): S188—S201. doi: 10.1134/S0001437023070068.
19. Semenova A. S., Dmitrieva O. A. Plankton communities of the system “Pregolya River—Vistula Lagoon—Kaliningrad Sea Canal (KMC)—Baltic Sea”. *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN = Proceedings of the Zoological Institute of the RAS*. 2023; 327(3): (430—450). (In Russ.). doi: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.430.
20. Biryukova A. D., Muratova A. A., Ulyanova M. O. Analysis of the variability of the parameters of the carbonate system in the mixing zone of river, lagoon and sea waters (on the example of the south-astern part of the Baltic Sea). *Uspekhi sovremenennogo estestvoznaniya = Advances in modern natural science*. 2025; 7: (8—19). (In Russ.). doi: 10.17513/use.38406.
21. Lukashin V. N., Krechik V. A., Klyuyvitkin A. A. et al. Geochemistry of suspended particulate matter in the marginal filter of the Pregolya River (Baltic Sea). *Oceanology*. 2018; 58(6): 856—869. doi: 10.1134/S0001437018060097.
22. Aleksandrov S. V. Long-term changes in the primary production of phytoplankton in the ecosystem of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea. *Inland Water Biology*. 2024; 17(1): 37—47. doi: 10.1134/S1995082924010036.
23. Chubarenko B. V., Dvoeglazova N. V., Boskachev R. V. et al. Spatio-temporal variability of hydrological characteristics in the mixing zone of the Pregolya River (South-Eastern Baltic) and methodological approaches to its study. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2024; 52(1): (157—176). doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8. (In Russ.).
24. Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975; 167(2): 191—194. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
25. *Rukovodstvo po himicheskому analizu morskikh i presnyh vod pri ekologicheskem monitoringe rybohozyajstvennyh vodoyomov i perspektivnyh dlya promysla rajonov Mirovogo okeana. = Manual to chemical analysis of sea and fresh waters in environmental monitoring of fishery water bodies and areas of the World Ocean that are promising for fishing*. Moscow: VNIRO, 2003: 202 p. (In Russ.).
26. Chubarenko B. V. Zoning of the Kaliningrad Bay and the mouth of the Pregolya River based on indicators of the hydrological and ecological state and in order to optimize monitoring. *Kompleksnoe issledovanie processov, harakteristik i resursov rossijskikh morej Severo-Evropejskogo bassejna = Comprehensive study of the processes, characteristics and resources of the Russian seas of the North European Basin*. Issue 2. Apatity: Publishing House of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2007: 591—601. (In Russ.).
27. Aleksandrov S. V. Spatial changes in hydrochemical indicators in the Vistula Lagoon in 2014-2016. *Trudy AtlantNIRO = Proceedings of AtlantNIRO*. 2018; 2 (1): (5—21). (In Russ.).

28. Stashko A. V., Aleksandrov S. V. Spatial distribution and seasonal dynamics of hydrochemical conditions in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea in 2020-2022. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological Research*. 2023; 51(1): 71—90. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4. (In Russ.).
29. Fairbridge R. W. The estuary: its definition and geodynamic cycle. *Chemistry and Biochemistry of Estuaries*. John Wiley, New York, 1980: (1—35).
30. Domnin D., Chubarenko B., Capell R. Formation and re-distribution of the river runoff in the catchment of the Pregolya River. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2018; 65: 269—284. doi: 10.1007/698_2017_97.
31. *Gidrometeorologicheskaya obstanovka po Kaliningradskoj oblasti = Hydrometeorological situation in the Kaliningrad Oblast*. Kaliningrad Center for Hydrometeorological Survey — branch of the Federal State Budgetary Institution “North-West MSMS”. 2024. URL: <https://meteo39.ru/news.html>. (In Russ.).
32. Kudryavtseva E. A., Aleksandrov S. V. Hydrological and hydrochemical underpinnings of primary production and division of the Russian sector in the Gdansk Basin of the Baltic Sea. *Oceanology*. 2019; 59(1): 49—65. doi: 10.1134/S0001437019010077.
33. Boitsov V. D. Long-term variability of the sea surface temperature (SST) in the North and Baltic Seas for the 1900—2020. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2021; (63): 236—254. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-236-254. (In Russ.).
34. Shishkina T. R., Efimova Yu. V., Lavrova I. V., Ivanova I. A., Ivanova E. P. Formation of an anomalous thermal regime in autumn and spring on the European territory of Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (74): 57—72. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-57-72. (In Russ.).
35. Gruzdev A. I., Lobanov V. A. Assessment of modern climate changes in air temperature in the North-western Federal District. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025; (79): 307—323. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2025-79-307-323. (In Russ.).
36. Rakhuba A. V. Assessment of the influence of the hydrodynamic regime on the development of phytoplankton and water quality of the Kuibyshev Reservoir. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki = Scientific Notes of Kazan University. Series: Natural Sciences*. 2020; 162 (3): 430—444. (In Russ.). doi: 10.26907/2542-064X.2020.3.430-444. (In Russ.).
37. Aleksandrov S. V., Gorbunova J. A. Phytoplankton production and chlorophyll content in estuaries of different types. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta = Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University*. 2012; (1): (90—98). (In Russ.).
38. Kownacka J., Całkiewicz J., Korniów R. A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century. *Oceanologia*. 2020; 62(4): 538—555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004
39. Nawrocka L., Kobos J. The trophic state of the Vistula Lagoon: an assessment based on selected biotic and abiotic parameters according to the Water Framework Directive. *Oceanologia*. 2011; 53(3): 881—894. doi: 10.5697/oc.53-3.881.
40. Whitton B. Freshwater plankton. *The biology of blue-green algae*. 1973; 9: 353—367.
41. Kruk M., Jaworska B., Jabłonska-Barna I. et al. How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? *Oceanologia*. 2016; 58(4): 341—352. doi: 10.1016/j.oceano.2016.05.004.
42. Waughman G. The effect of temperature on nitrogenase activity. *Journal of Experimental Botany*. 1977; 28(105): 949—8960. doi: 10.1093/jxb/28.4.949.
43. Aleksandrov S. V., Stashko A. V. Ecological state of the Vistula Lagoon due to parameters of water quality and eutrophication. *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Yestestvennye i meditsinskiye nauki = Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*. 2023; (3): (78—91). doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6. (In Russ.).
44. Chechko V. A., Topchaya V. Yu., Babakov A. N. New map of bottom sediments of the Kaliningrad Gulf of the Baltic Sea. *KSTU News*. 2023; (69): (44—56). doi: 10.46845/1997-3071-2023-69-44-56. (In Russ.).
45. Underwood G. J. C., Kromkamp J. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Advances in Ecological Research*. 1999; 29: 93—153. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60192-0.

46. Le Y., Zhao Y., Liu X. et al. Distribution characteristics and influencing factors of chlorophyll a in the Pearl River Estuary and surrounding waters during spring and summer of 2023. *Regional Studies in Marine Science*. 2025; 87: 104241. doi: 10.1016/j.rsma.2025.104241.
47. Fisher T. R., Harding Jr. L. W., Stanley D.W. et al. Phytoplankton, nutrients, and turbidity in the Chesapeake, Delaware, and Hudson estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1988; 27(1): 61—93. doi: 10.1016/0272-7714(88)90032-7.

Сведения об авторах

Сергей Валерьевич Александров, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геоэкологии, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, hydrobio@mail.ru.

Юлия Александровна Горбунова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория прибрежных систем, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, julia_gorbunova@mail.ru.

Надежда Вадимовна Двоеглазова, младший научный сотрудник, лаборатория прибрежных систем, Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, nadya2eyes@mail.ru.

Information about authors

Sergey Valerievich Aleksandrov, PhD (Biol. Sci.), Leading Researcher, Laboratory of Geoecology, Atlantic Branch of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

Yulia Aleksandrovna Gorbunova, PhD in Biology, Researcher, Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

Nadezhda Vadimovna Dvoeglazova, Junior Researcher, Laboratory for Coastal Systems Study, Atlantic Branch of the Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 07.09.2025
Принята в печать 27.10.2025*

*The article was received on 07.09.2025
The article was accepted on 27.10.2025*