

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ, ГЕОЭКОЛОГИЯ И ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 574.52

С. В. Александров

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ И СЕЗОННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭСТУАРНОЙ СИСТЕМЕ РЕКИ ПРЕГОЛИ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

99

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

Поступила в редакцию 09.04.2025 г.

Принята к публикации 18.06.2025 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-7

Для цитирования: Александров С. В. Пространственное и сезонное распределение биогенных веществ в эстуарной системе реки Преголи и прилегающей акватории Балтийского моря // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные науки. 2025. №3. С. 99–115. doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-7.

Представлены сезонные и пространственные изменения содержания биогенных элементов (минеральных форм азота и фосфора) в эстуарной системе реки Преголи (Калининградский морской канал, Калининградский залив) и прибрежной зоне Балтийского моря в 2024 г. Их сезонная динамика характеризовалась максимумом в период половодья. Минимумы были весной и летом при «цветении» воды на фоне интенсивного прогрева вод. Пространственное распределение характеризовалось наибольшими величинами азота и фосфора в устьевой зоне, куда поступает сток реки Преголи. Отмечено эпизодическое загрязнение, превышающее ПДК по аммонийному и нитритному азоту, в восточном районе Калининградского морского канала, в том числе в районе выпуска очистных сооружений Калининграда. В зимний период концентрации минерального азота и фосфора соответствовали потенциально гипертрофному уровню согласно классификации для вод Балтийского моря, который реализуется в высокой биопродуктивности эстуарной системы реки Преголи. Увеличение фосфора летом при низкой концентрации азота создает условия для развития цианобактерий и «цветения» воды. Поступление биогенных веществ через морской пролив увеличивает их концентрации в прибрежной зоне и способствует эвтрофированию этого района Балтийского моря.

Ключевые слова: река Преголя, Калининградский морской канал, соленость, азот, фосфор, загрязнение, трофический статус, «цветение» воды

Введение

Река Преголя относится к средним рекам Балтийского моря. Ее водосборный бассейн охватывает большую часть Калининградской области и Варминско-Мазурского воеводства. Преголя впадает в восточную



часть Калининградского залива, составляя половину его материкового стока [20]. Вдоль северного берега залива проходит Калининградский морской канал — гидротехническое сооружение, построенное в 1901 г., длиной 43 км и глубиной 9–12 м. В восточной части канал отделен от залива насыпными дамбами, а западная его часть проходит по открытой акватории залива и соединяется с Балтийским морем проливом через Балтийскую косу.

Калининградский залив, Калининградский морской канал и устьевой участок Нижней Преголи образуют единую гидрологическую систему [17]. Значительная часть воды из реки Преголи поступает в Калининградский морской канал, который направляет эту воду по относительно глубоководному руслу в Балтийское море. Поступление через пролив морских вод в залив многократно превышает материковый сток [20], в результате водоем имеет гидрологические признаки эстuarной системы [26]. В нем происходит перемешивание речных и морских вод, особенно интенсивное в искусственно углубленном желобе морского канала, что определяет выраженную неоднородность пространственного распределения гидрологических, химических, биологических показателей [10; 22; 24].

Гидрологические условия в реке Преголе и Калининградском морском канале изучаются длительный период, в том числе интенсивные работы выполняются в последние годы. Исследования показали наличие выраженных градиентов солености в зонах смешения речных вод с водами канала и их дальнейшего смешения с водами Балтийского моря, а также влияние речного стока и ветрового режима на пространственное положение градиентных зон [7; 8; 10; 17; 22].

На гидрохимический режим и загрязнение Калининградского залива и Калининградского морского канала как его части влияют как природные факторы (сток пресных вод реки Преголи, нагоны соленых вод Балтийского моря и др.), так и антропогенные. Большие объемы биогенных элементов поступают со стоком реки Преголи, на водосборной территории которой расположены многочисленные источники загрязнения [5; 6; 11; 24]. До 2016 г. ведущим источником антропогенного загрязнения были сточные воды г. Калининграда, подвергаемые только механической очистке и сбрасывавшиеся в Приморскую бухту, где регистрировались высокие концентрации биогенных веществ с регулярным превышением ПДК [1]. Введенные в эксплуатацию в 2016 г. очистные сооружения имеют значительно лучшую очистку, а их выпуск перенесен в восточный участок Калининградского морского канала. В последние годы наблюдается снижение загрязнения вод в Приморской бухте одновременно с его увеличением в восточном районе залива [3; 16]. Кроме выпуска очищенных сточных вод Калининграда и поступления загрязнения со стоком реки Преголи значимое антропогенное влияние могут оказывать точечные источники вдоль акватории канала, где расположен ряд крупных населенных пунктов (г. Балтийск,



Светлый, пос. Ижевское и др.) и промышленных предприятий (ЗАО «Содружество-Соя», рыболовецкий колхоз «За Родину», ООО «Лукойл-Калининградморнефть» и др.).

В Калининградском заливе с начала 1990-х гг. ведется регулярный гидрохимический мониторинг, в том числе биогенных элементов, который показал пространственную неоднородность между районами, периодическое загрязнение вод и формирование в заливе эвтрофногипертрофной экосистемы, в которой наблюдается «цветение» вод [1; 3; 15; 16; 23; 27]. Однако эти исследования не затрагивали акваторию Калининградского морского канала, район устья реки Преголи, а также морского пролива и прилегающей зоны Балтийского моря. Ранее было показано, что воды залива и восточной части канала, разделенные насыпными дамбами, практически не смешиваются, следовательно, их можно отнести к разным гидрологическим объектам [8]. В акватории морского канала могут формироваться гидрохимические условия, отличные от ранее исследованных в заливе. По распределению взвешенных веществ и ряда металлов наблюдается формирование маргинального фильтра реки Преголи, в котором происходит уменьшение взвеси, обогащение биогенным материалом и, возможно, техногенное загрязнение рядом микроэлементов [10]. Поступление вод Калининградского залива и морского канала через Балтийский пролив влияет на акваторию Балтийского моря, что прослеживается на расстоянии 20–30 км [4; 18; 24]. Опубликованные данные по биогенным элементам в Калининградском морском канале дают предварительную информацию о сезонной и пространственной изменчивости, обусловленной биологическим процессами и, вероятно, дополнительным антропогенным загрязнением вод [2; 24]. Однако они ограничены либо одним сезоном (весна), либо небольшой акваторией (восточная часть) и могут не отражать современное состояние, в частности с учетом ввода в эксплуатацию очистных сооружений Калининграда и переноса их выпуска в морской канал.

Целью работы стало выполнение анализа сезонных изменений концентрации биогенных элементов как важнейших гидрохимических компонентов, отражающих современное загрязнение вод и биопродукционные процессы, на всей акватории эстuarной системы реки Преголи, включающей устье реки, Калининградский морской канал, залив, морской пролив и прибрежную зону моря.

Материалы и методы

Исследования велись вдоль Калининградского морского канала от устья реки Преголи до морского пролива, а также в прилегающей акватории Гданьского залива Балтийского моря. Расположение 12 комплексных станций (№1–18) позволило получить данные о пространственном распределении биогенных элементов (рис. 1). Исследования выполнялись в различные сезоны (27 февраля, 13 мая, 25 июня и 8 ноября 2024 г.).



102

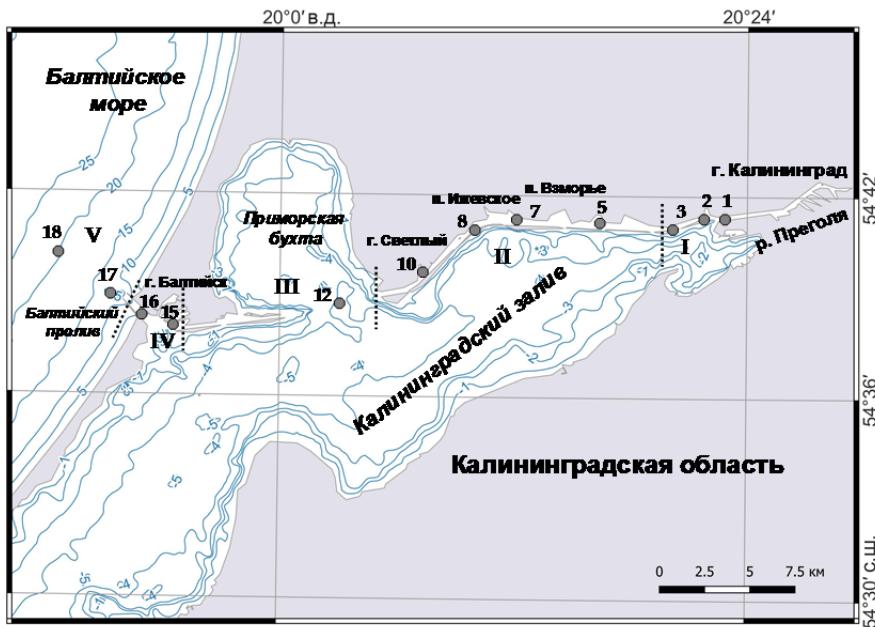


Рис. 1. Схема станций (1 – 18) вдоль Калининградского морского канала и в Балтийском море и их деление по районам (I – V)

Соленость и температуру определяли мультипарметрическими зондами CastAway и Sea&Sun CTD90M. Пробы воды отбирали батометрами Нискина с последующим определением концентрации биогенных элементов по стандартным методикам [14] на спектрофотометре КФК-3КМ в лаборатории геоэкологии АО ИО РАН.

При описании пространственной и сезонной изменчивости использованы данные по гидрологическим условиям и содержанию минеральных форм биогенных элементов (азот аммонийный, нитратный, нитритный, фосфор фосфатов), полученные для подповерхностного слоя (0 – 1 м), которые отражают распространение речных вод Преголи, а также влияние биологических процессов в фотическом слое. Для оценки загрязнения вод применялись ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, обозначенные в приказе Минсельхоза РФ № 552 от 13 декабря 2016 г.

При анализе пространственной изменчивости в работе предложено условное деление акватории на 5 районов, которые отличаются физико-географическими и гидрологическими особенностями (рис. 1):

I – устьевая зона (станции 1 – 3) с выраженным влиянием речных вод Преголи (до 1 ПЕС в мае) и загрязнения с водосборной площади;

II – восточный район (станции 5 – 10): участок морского канала, отделенный насыпными дамбами от акватории залива, где происходит активное взаимодействие речных и солоноватоводных вод залива, а также поступление загрязнений от крупных промышленных объектов и с выпуском очищенных сточных вод Калининграда;



III – акватория залива (станция 12): участок морского канала, проходящий по открытой акватории Калининградского залива;

IV – район морского пролива (станции 15, 16), где происходит активное взаимодействие вод Балтийского моря и эстуарных вод из залива и морского канала;

V – морской район (станции 17, 18): прибрежная акватория Балтийского моря до изобаты 20 м, где значительное влияние может оказывать сток, поступающий из Калининградского залива.

Результаты и обсуждение

Гидрологические условия

103

Погодные условия в период проведения исследований в 2024 г. характеризовались повышенной температурой воздуха в феврале (среднемесячная температура выше нормы на 4,5–5°C), мае (выше нормы на 3–4°C) и конце июня (выше нормы на 4,5–5°C, с прогревом до 30–33°C), согласно данным Калининградского ЦГМС. Температура воды 27 февраля 2024 г. характеризовалась достаточно однородным прогревом поверхностного слоя (4,5–6°C), незначительно снижаясь от устьевой зоны к прибрежной Балтике (рис. 2, а). Весной в мае поверхностные воды в районе морского пролива и в прибрежной части моря были прогреты на 4–5°C менее, чем воды канала и залива (до 17°C в устьевой зоне). Осенью в ноябре, наоборот, морской район сохранял больший прогрев (до 11°C) по сравнению однородным распределением на остальной акватории (около 8°C). Летом в июне температура воды постепенно снижалась от устьевой зоны к морскому району в диапазоне 17–24°C. Пространственное распределение температуры характеризовалось резким изменением (на 2–3°C) в районе морского пролива весной и осенью, а сезонная динамика – интенсивным летним прогревом (до 22–24°C в июне).

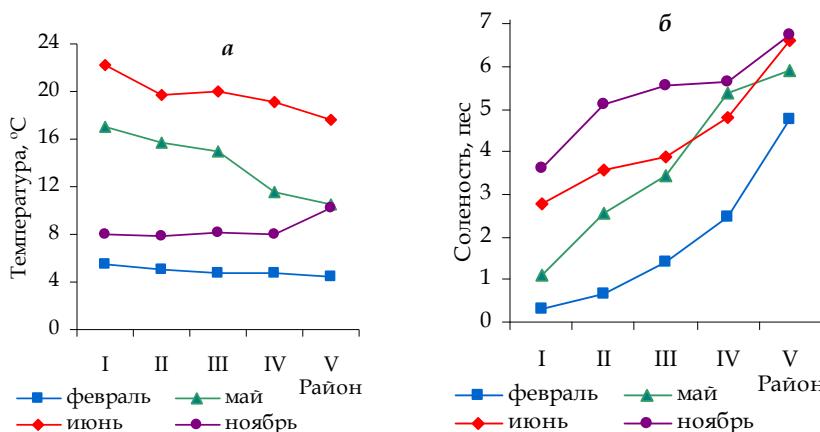


Рис. 2. Гидрологические условия в морском канале и прибрежной Балтике:
а – температура воды; б – соленость; I – устьевая зона, II – восточный район,
III – акватория залива, IV – район пролива, V – морской район



Соленость подповерхностного слоя закономерно увеличивалась от устья реки Преголи до морского района во все сезоны года (рис. 2, б). Для Преголи характерна значительная внутригодовая изменчивость стока. Наибольший расход воды (период половодья) наблюдается в феврале – марте, а минимальный (межени) – в мае – октябре [21], что значительно влияет на сезонную изменчивость солености в эстuarной системе. Согласно данным Калининградского ЦГМС, в феврале 2024 г. в Калининградской области среднемесячная температура воздуха была выше нормы на 4,5–5 °C, а количество осадков больше на 180–250 %, вследствие чего водность рек области была выше среднемноголетней, в том числе Преголи (уровень воды ГП-1 Гвардейск выше на 133 см). Минимальная соленость (0,1–0,8 ПЕС), характерная для пресных вод (<1 ПЕС), распространялась в период исследований 27 февраля на устьевую зону и восточный район, что обусловлено значительным речным стоком в этот период. В акватории залива и в проливе соленость возрастила, резко увеличиваясь в морском районе (до 4,8 ПЕС).

Согласно данным Калининградского ЦГМС, в последующие месяцы происходил спад уровня воды в реке Преголе до среднемноголетних значений в марте и ниже в апреле и мае. В период исследований 13 мая влияние речных вод (соленость <1 ПЕС) сохранялось в устьевой зоне, а в восточном районе и заливе соленость увеличивалась до 3,5 ПЕС, в проливе отмечено резкое увеличение солености с 4,3 до 6,4 ПЕС, которая соответствовала наблюдаемой в море. Летом (июнь) и осенью (ноябрь) в устьевой зоне соленость была повышена до 2,5–4 ПЕС. Это связано с уменьшением речного стока в период межени, а также с распространением вверх по каналу солоноватоводных вод залива. В частности, в ноябре 2024 г. среднемесячный уровень Преголи был ниже среднемноголетнего и было отмечено существенное различие между устьевой зоной и восточным районом (в среднем 3,6 и 5,1 ПЕС). Также в июне и ноябре значительно увеличивалась соленость в морском районе при достаточно равномерном распределении солоноватых вод в восточном районе и заливе (рис. 2, б).

Наблюданное в 2024 г. пространственное и сезонное распределение температуры и солености воды в целом соответствует описанным ранее закономерностям для морского канала и залива [1; 10; 21; 22; 24]. Летом 2024 г. наблюдался интенсивный прогрев вод (>20 °C), способствующий «цветению» воды при развитии фитопланктона, что могло оказать влияние в использование биогенных элементов.

Содержание биогенных элементов

Основным гидрохимическим источником эвтрофирования водных экосистем служат высокие концентрации фосфора и азота [9]. Исследования биогенной нагрузки на Калининградский залив показали, что основным источником фосфора являются сточные воды (включая Калининград), а азота – сельскохозяйственные угодья [5; 6; 19].

Аммонийный азот связан преимущественно с биохимическим разложением органических веществ в водоеме или на водосборной терри-



тории. В 2024 г. наибольшие концентрации аммонийного азота наблюдались в феврале из-за большого поступления органических веществ и их первичным разложением в речной воде в период половодья. Высокие концентрации были в устьевой зоне и в заливе (в среднем 232 и 247 мкг N/л) и снижались в морском проливе и прибрежной Балтике (рис. 3, а). Наряду с этим выделялся восточный район, где отмечены повышенные концентрации (в среднем 338 мкг N/л), возможно из-за антропогенного загрязнения. Весной, в мае, концентрации были относительно небольшими, постепенно снижаясь от устьевой зоны до морского района (с 35 до 2 мкг N/л), что связано с нитрификацией. Летом содержание аммонийного азота в устьевой зоне и заливе было сопоставимо с весной, на этом фоне снова выделялся восточный район, где отмечались повышенные концентрации. Осенью после прекращения активной жизнедеятельности планктона концентрации аммонийного азота возрастили, особенно в устьевой зоне и в восточном районе, в заливе содержание аммонийного азота снижалось в 4 раза, в морском районе было минимальным. В ноябре с речным стоком в аммонийной форме поступало в несколько раз больше азота, чем в виде нитратов, в отличие от февраля.

В целом наибольшие концентрации аммонийного азота отмечены в устьевой зоне и в восточном районе (рис. 3, а), куда они поступают с речным стоком и, возможно, в результате антропогенного загрязнения. В заливе содержание аммонийного азота ниже, в июне — многократно, и его поступление по морскому каналу может оказывать эвтрофирующее влияние на залив и на прибрежную Балтику. В частности, концентрация аммонийного азота на выходе из восточного района была многократно выше, чем в заливе (соответственно 152 и 13 мкг N/л в июне, 225 и 89 мкг N/л в ноябре). Также в ноябре было увеличение в прибрежной зоне по сравнению с более мористым районом (19 и 5 мкг N/л).

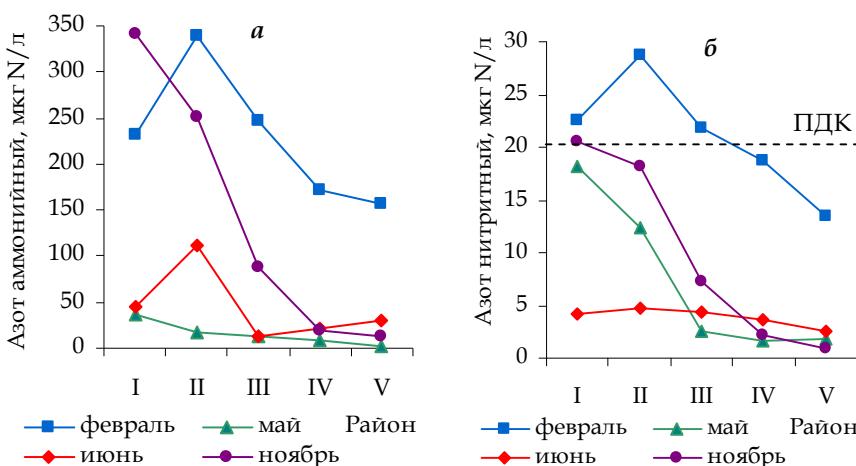


Рис. 3. Концентрации аммонийного азота (а) и нитритного азота (б) в морском канале и прибрежной Балтике



Нитритный азот в природных водах представляет собой промежуточный продукт окисления аммоний-иона до нитрат-иона. В 2024 г. наибольшие концентрации нитритного азота были в феврале и ноябре одновременно с высоким содержанием аммонийного азота и согласовывались с его пространственным распределением (коэффициент корреляции $r = 0,77$ и $0,88$). Максимальные величины отмечались в устьевой зоне и восточном районе и значительно снижались в заливе (рис. 3, б). В феврале от устьевой зоны до залива и в ноябре в устьевой зоне концентрации нитритного азота превышали ПДК (20 мкг N/л). Такое высокое содержание нитритного азота, вероятно, связано с окислением в воде аммоний-иона, концентрации которого также были максимальны в этих районах. Летом низкие концентрации нитритного азота (3–5 мкг N/л) наблюдались на всей акватории. Минимальные концентрации отмечены в заливе и морском районе, особенно с мая по ноябрь (1–3 мкг N/л). Сезонная динамика нитритного азота в разных районах существенно различалась. В устьевой зоне и восточном районе она характеризовалась высокими величинами на протяжении большей части года, за исключением летней межени. На акватории залива и в морском районе, напротив, концентрации были на низком уровне в течение года, за исключением периода половодья, когда большое количество нитритного азота поступает с речным стоком в эти районы.

Нитратный азот является важнейшей формой поступления азота в водные экосистемы с речным стоком. Его содержание имеет выраженную сезонную изменчивость. Поступление в период половодья с речными водами Преголи определяет сезонный максимум. В феврале 2024 г. наибольшие концентрации (990–1130 мкг N/л) были в устьевой зоне и восточном районе, заполненном пресными водами стока Преголи (рис. 4, а, правая ось Y). В заливе и морском районе величины нитратного азота снижались, но сохранялись на достаточно высоком уровне (700–820 мкг N/л). Весной (апрель – май) нитраты интенсивно потребляются водорослями, поэтому их концентрация многократно уменьшалась. В мае 2024 г. максимальные концентрации (в среднем 466 мкг N/л) отмечались в устьевой зоне, где сохранялось сильное влияние речных вод (соленость <1 ПЕС) (рис. 4, а, левая ось Y). Речной сток распространялся до начала восточного района (станция 5 – соленость 1,5 ПЕС), дальше акватория была занята более солеными водами (2,5–2,9 ПЕС), в которых наблюдалось аномально высокое весеннее «цветение» (хлорофилл «а» соответствовал гипертрофному уровню, >100 мкг/л). Весь нитратный азот использовался фитопланктоном, и наблюдалось резкое уменьшение его концентрации: от 454 (станция 5) до 3 мкг N/л (станция 7) на расстоянии 5 км. Минимальные концентрации в мае наблюдались в заливе, незначительно увеличиваясь в прибрежной Балтике (0,2 и 2 мкг N/л). Летом в июне высокая величина нитратного азота была только на границе реки и устьевой зоны (станция 1 – 101 мкг N/л), но уже в самой устьевой зоне (станции 2, 3) азот использовался до концентрации 7–8 мкг N/л при «цветении» воды (хлорофилл «а» >100 мкг/л). Минимальные концентрации отмечались в заливе и прибрежной Бал-



тике ($1-4$ мкг N/л), где их активно использовал фитопланктон. Осенью величины нитратного азота увеличиваются из-за снижения обилия фитопланктона. В ноябре в устьевой зоне и восточном районе наблюдались повышенные концентрации (122 и 112 мкг N/л). В самом заливе эти величины уменьшались в 4–5 раз, а в морском районе были минимальны.

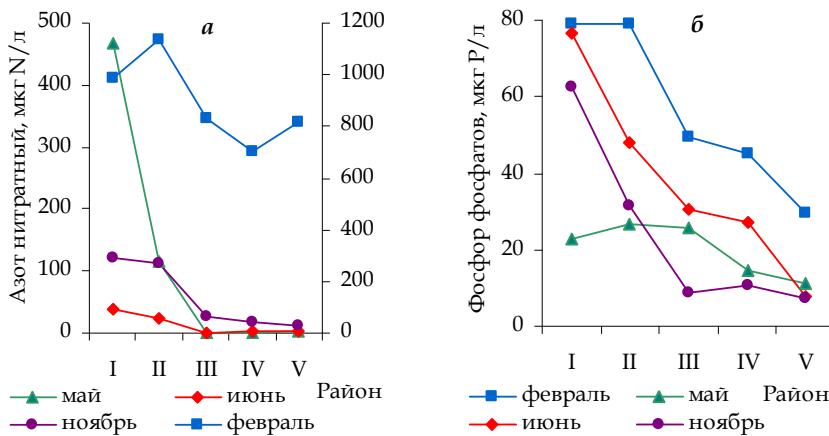


Рис. 4. Концентрации нитратного азота (а) и фосфора фосфатов (б) в морском канале и прибрежной Балтике

Сезонная динамика нитратного азота в Калининградском морском канале в целом соответствовала ранее установленной для Вислинского залива и реки Преголи [1; 12; 15; 16], характеризуясь максимумом до начала активного развития фитопланктона весной, летним минимумом, особенно в условиях «цветения» воды, и постепенным увеличением осенью. Отличия наблюдались только в районе устьевой зоны, где были высокие концентрации азота весной и летом, обусловленные поступлением с речным стоком (рис. 4, а).

Во время половодья (февраль) и слабого развития фитопланктона (февраль, ноябрь) область высоких концентраций нитратного азота распространялась на восточный район. В эти периоды поступление нитратного азота по морскому каналу может оказывать эвтрофирующее влияние на залив и опосредованно на прибрежную Балтику. В частности, в ноябре 2024 г. концентрация азота на выходе из восточного района была значительно выше, чем в заливе (128 и 25 мкг N/л), а в морской зоне за проливом (станция 17–19 мкг N/л) – многократно выше, чем мористее (станция 18–3 мкг N/л).

Фосфор фосфатов имеет сезонную изменчивость, максимальные концентрации формируются за счет зимней аккумуляции на водосборной территории и поступления с речным стоком. В 2024 г. наибольшие концентрации наблюдались в конце февраля, в устьевой зоне и восточном районе, заполненном пресными водами Преголи, они составляли в среднем 79 мкг P/л. В заливе и в районе пролива концентрации снижались, но сохранялись на достаточно высоком уровне (45–50 мкг P/л),



уменьшаясь в морском районе (до 30 мкг Р/л) (рис. 4, б). Весной содержание фосфора снижалось, без максимума в устьевой зоне, и уменьшалось в морском районе. Концентрация фосфора вновь возрастала летом, несмотря на его интенсивное использование фитопланктоном: максимальная концентрация (102 мкг Р/л) отмечена на границе реки и устьевой зоны, далее она постепенно уменьшалась. В конце осени концентрации фосфора были ниже. Наибольшие величины фосфора фосфатов отмечены в устьевой зоне (63 мкг Р/л), снижаясь в два раза в восточном районе, а в заливе и морском районе концентрации были значительно ниже (7–11 мкг Р/л) из-за затока морских вод (рис. 4, б). В заливе фосфора фосфатов обычно в 1,5–3 раза меньше, чем в восточном районе, и его поступление по каналу оказывает эвтрофирующее влияние на Калининградский залив и прибрежную зону Балтики.

В целом наибольшие концентрации фосфора фосфатов характерны для устьевой зоны, куда фосфаты поступают со стоком реки Преголи. В феврале область высоких концентраций фосфора, так же как и азота, распространялась на восточный район (рис. 4, б). На концентрацию фосфора оказывали влияние как интенсивность поступления с речным стоком, так и заток морских вод и распределение этих вод в эстуарной системе. Для февраля, мая и ноября наблюдалась высокая зависимость от солености воды (достоверность аппроксимации $R^2=0,90-0,94$). Более пресные воды характеризовались повышенной концентрацией фосфора, поступающего с речным стоком, и наоборот, заток морских вод мог снижать концентрацию фосфора за счет разбавления (рис. 5). Зависимость отсутствовала только в мае, когда с увеличением солености в восточном районе и заливе одновременно увеличивалось содержание фосфора фосфатов из-за внутренней биогенной нагрузки.

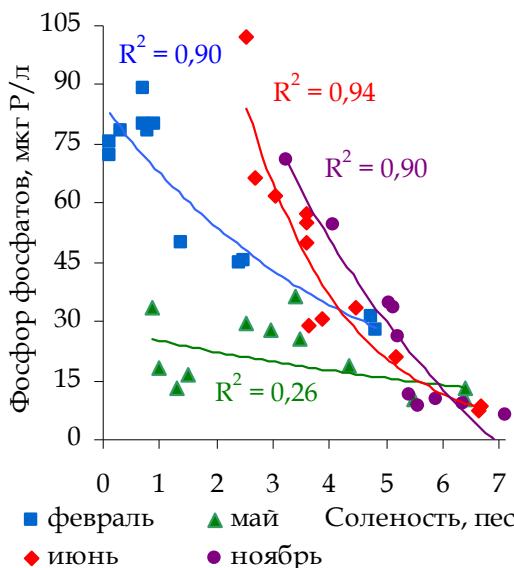


Рис. 5. Зависимость между соленостью и фосфором фосфатов в морском канале и прибрежной Балтике



Сезонная динамика содержания фосфора фосфатов имеет отличие от внутригодовой изменчивости, типичной для водных экосистем умеренных широт. Наряду с характерным максимумом зимой и в начале весны до начала активного развития фитопланктона, весенним снижением и постепенным увеличением осенью наблюдается рост концентраций минерального фосфора летом. Такое увеличение вероятно, связано с активной минерализацией органического вещества в воде и донных осадках и ранее отмечалось в высоковтрофном Калининградском заливе [1; 13; 16; 25; 29].

Антропогенное загрязнение

109

Проведенные в 2024 г. исследования показали, что наибольшие концентрации биогенных веществ, превышающие ПДК, наблюдаются в восточном районе Калининградского морского канала, где находится выпуск очистных сооружений Калининграда и ряд промышленных предприятий и населенных пунктов. Основное загрязнение отмечается по аммонийному и нитритному азоту. Эти вещества могут поступать со слабоочищенными сточными водами. В феврале ниже выпуска очистных сооружений (станция №5) наблюдалось двукратное увеличение аммонийного азота (до 444 мкг N/л), превышающее ПДК (400 мкг N/л). Также повышенные концентрации аммонийного азота отмечены в районе пос. Ижевское и г. Светлый: они достигали 152–183 мкг N/л в июне, что было многократно выше, чем восточнее.

Нитритный азот – единственный показатель из биогенных элементов, который в Калининградском заливе может сезонно в период половодья превышать ПДК (20 мкг N/л), что наблюдалось в феврале 2024 г. на значительной акватории от устья реки до акватории залива. Ранее такое превышение уже отмечалось в Калининградском заливе в ранневесенний период [1; 16]. В этот период высокие концентрации нитритов не связаны напрямую с антропогенным загрязнением со сточными водами, а являются результатом окисления в воде аммоний-иона, в большом количестве поступающего с речным стоком. Наряду с этим отмечается и антропогенное загрязнение по нитритному азоту, так как его наибольшие величины (1,5–2-кратный рост концентрации до 33–39 мкг N/л) регулярно (февраль, май, ноябрь) выявлялись ниже выпуска очистных сооружений (станция №5).

Для нитратного азота не выделены зоны высоких концентраций, которые могут быть связаны со значительным и регулярным антропогенным загрязнением, в частности у выпуска очистных сооружений Калининграда. Отмечено локальное увеличение в июне в районе пос. Ижевское (на 50 %) по сравнению с участками выше и ниже. На всей акватории концентрации в течение года были многократно ниже ПДК для рыбоводческих водоемов (9100 мкг N/л).

Опубликованные данные по биогенным элементам в Калининградском морском канале ограничены, в частности наблюдениями в 2005–2006 гг. [2], однако также показывают превышение ПДК по азоту между



пос. Взморье и г. Светлый (аммонийный азот 442 и 474 мкг N/л в апреле и ноябре). В 2024 г. уровень загрязнения был ниже, что, возможно, свидетельствует об улучшении очистки вод и экологической ситуации в целом. Это подтверждает тенденцию для Калининградского залива, когда после введения в 2016 г. новых очистных сооружений Калининграда содержание аммонийного азота снизилось и перестало отмечаться превышение ПДК [1; 16]. Превышения по азоту имели однократный характер, но требуют внимания для оценки эффективности работы очистных сооружений Калининграда и выявления потенциальных источников загрязнения вод в районе пос. Ижевское и г. Светлый.

110

Для фосфора фосфатов не отмечено локальное повышение концентраций в местах возможного антропогенного воздействия. На всей акватории восточного района, включая район выпуска очистных сооружений Калининграда, пос. Ижевское, г. Светлый, наблюдались близкие величины фосфора. До 2016 г. в Приморской бухте, куда поступали неочищенных сточные воды Калининграда, отмечалось превышение ПДК для эвтрофных вод (200 мкг P/л), что могло быть следствием антропогенного загрязнения [1; 16; 25]. Значительно более низкие величины в 2024 г., вероятно, свидетельствуют об удовлетворительной работе новых очистных сооружений, предусматривающих дефосфатирование.

Уровень эвтрофирования и гидрохимические условия «цветения» воды

В качестве основополагающих критериев трофического статуса (эвтрофирования вод) используют ключевые для функционирования водных экосистем биологические и гидрохимические показатели, в том числе концентрацию минерального азота и фосфора в зимний период. Они характеризуют нагрузку на экосистему и ее потенциальную возможность достичь определенного уровня биопродуктивности [9]. Согласно принятой для вод Балтийского моря, включая прибрежные зоны, классификации [28], концентрация минерального азота (сумма аммонийного, нитритного и нитратного азота) в феврале 2024 г. на всей акватории (840–1800 мкг N/л) соответствовала потенциально гипертрофному уровню (>840 мкг N/л). Концентрация фосфора фосфатов в устьевой зоне и восточном районе (78–89 мкг P/л) также приближалась к этому уровню (93 мкг P/л). В заливе и морском проливе (50 и 45 мкг P/л) она соответствовала эвтрофному уровню, в прибрежной Балтике (30 мкг P/л) снижалась до пограничного с мезотрофными водами состояния (условная граница 25 мкг P/л) (рис. 3, 4). При избытке азота, поступающего с речным стоком в период половодья, поступление и содержание фосфора в этот период определяет потенциальный уровень биопродуктивности. В весенний период (май) в восточном районе наблюдалось массовое развитие фитопланктона до гипертрофного уровня (хлорофилл «а» >100 мкг/л), которое вдвое снижалось в



заливе и далее в прибрежной Балтике. Потенциальный трофический уровень по зимним концентрациям азота и фосфора соответствует наблюдаемому гипертрофному состоянию Калининградского залива (по обилию и продуктивности планктона) по многолетним данным [3].

В период интенсивного развития фитопланктона концентрации азота снижались до минимальных величин, а концентрации фосфора фосфатов, напротив, сохранялись на высоком уровне, особенно в восточном районе и заливе (26–27 мкг Р/л весной и 31–48 мкг Р/л летом) (рис. 3, 4). Вероятно, увеличение концентрации фосфора фосфатов обусловливается активной в теплый период минерализацией органического вещества. Летнее увеличение содержания фосфора фосфатов – характерная черта Калининградского залива и ряда других эвтрофных лагун Балтики, связанная с активно протекающими процессами деструкции органического вещества [1; 13; 16; 25]. При одновременно низкой концентрации минерального азота в эстуарной системе реки Преголи (включая морской канал и залив) соотношение минеральных форм N:P=1–3, что значительно ниже стехиометрического соотношения для фитопланктона. Как следствие, наблюдается азотная лимитация водорослей, и в этих условиях преимущество получают цианобактерии, способные к азотфиксации. В результате в морском канале и Калининградском заливе летом наблюдается «гиперцветение» воды (хлорофилл «а» >100 мкг/л), которое может неблагоприятно воздействовать на прибрежные зоны и условия обитания гидробионтов.

Заключение

Гидрохимический режим эстуарной системы реки Преголи во многом определяется поступлением азота и фосфора с водосборной территории, их участием в биологических процессах, а также антропогенным загрязнением. Сезонная динамика минеральных форм фосфора и азота характеризуется максимумом, связанным с накоплением в зимний период в водной экосистеме и на водосборной территории и интенсивным поступлением в период половодья. Весной с началом активной вегетации планктона содержание азота и фосфора значительно снижалось. Минимальные концентрации, особенно азота, характерны для лета, особенно в период «цветения» воды (хлорофилл «а» >100 мкг/л) при максимальном прогреве вод (>20°C). Осенью происходит увеличение содержания азота и фосфора, связанное с окончанием вегетационного периода. Сезонная динамика соответствовала ранее установленным закономерностям для Калининградского залива как части эстуария, но выявила значительно больший диапазон изменчивости с учетом анализа на всем протяжении от устья до морских вод.

Пространственное распределение минеральных форм азота и фосфора имело наибольшие величины в устьевой зоне, куда поступают речные воды Преголи, значительно снижаясь в заливе и морском районе. В период половодья (февраль) область высоких концентраций распространялась на восточный район (соленость <1 ПЕС). В условиях



интенсивного водообмена с морем часть минерального азота и фосфора, а также планктона поступает в прилегающую акваторию Балтийского моря, что увеличивает их концентрации в прибрежной зоне за морским проливом.

На концентрацию биогенных элементов оказывают влияние как интенсивность его поступления с речным стоком и заток морских вод, так и распределение этих факторов в эстуарной системе. Для фосфора фосфатов отмечена высокая корреляция с соленостью воды ($R^2=0,90-0,94$), обусловленная их повышенным поступлением с речным стоком и, наоборот, низкими концентрациями в морской воде.

Эстуарная система реки Преголи находится под значительным антропогенным воздействием, в том числе из точечных источников. Эпизодическое загрязнение, превышающее ПДК по аммонийному и нитритному азоту, и повышенные величины нитратного азота в 2024 г. наблюдались в восточном районе Калининградского морского канала у выпуска очистных сооружений Калининграда, а также у пос. Ижевское. По фосфору локального загрязнения не отмечено.

В зимний период в эстуарной системе реки Преголи концентрации минерального азота и фосфора соответствуют потенциально гипертрофному уровню, который реализуется в массовом весеннем развитии водорослей. Увеличение фосфора фосфатов летом при минимуме азота создает условия для развития азотфикссирующих цианобактерий и «цветения» воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025). Автор выражает благодарность Д.А. Найданову, В.В. Лариной, А.О. Корнеевой, М.О. Ульяновой за помощь в выполнении экспедиционных работ и гидрохимических анализов.

Список литературы

1. Александров С.В. Пространственные изменения гидрохимических показателей в Вислинском заливе в 2014–2016 годах // Труды АтлантНИРО. 2018. Т. 2, №1 (5). С. 5–21. EDN: LZNYIX.
2. Александров С.В., Сенин Ю.М. Гидрохимические условия в Калининградском морском канале // Промыслово-биологические исследования АтлантНИРО в 2006–2007 годах. Т. 1: Балтийское море и заливы. Калининград, 2009. С. 146–155.
3. Александров С.В., Стасико А.В. Экологическое состояние Вислинского залива с учетом параметров качества и эвтрофирования вод // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2023. №3. С. 78–91. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6.
4. Буканова Т.В., Бубнова Е.С., Александров С.В. Дистанционный мониторинг морской площадки карбонового полигона «Росянка» (Балтийское море): первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, №6. С. 234. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-234-247.
5. Горбунова Ю.А. Поступление биогенных веществ с водосборного бассейна реки Преголи в Вислинский залив // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. №1. С. 87–93. EDN: LDEOSJ.



6. Горбунова Ю.А., Чубаренко Б.В., Домин Д.А. Биогенная нагрузка на водосборный бассейн реки Преголи от антропогенных источников // Известия КГТУ. 2017. №47. С. 34–45. EDN: ZRTCRT.
7. Двоеглазова Н.В., Чубаренко Б.В. Гидрологическая ситуация накануне осолонения устьевого участка реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) // Труды Кольского научного центра РАН. Сер.: Естественные и гуманитарные науки. 2024. Т. 3, №1. С. 21–26. doi: 10.37614/2949-1185.2024.3.1.003.
8. Двоеглазова Н.В., Чубаренко Б.В. Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения // Гидрометеорология и экология. 2024. №74. С. 87–104. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104.
9. Коплан-Дикс И.С., Крыленкова Н.Л., Милиус А.Ю., Стравинская Е.А. Возможность количественной оценки пространственной неоднородности уровня трофии озер // Антропогенное перераспределение органического вещества в биосфере. СПб., 1993. С. 132–136.
10. Лукашин В.Н., Кречик В.А., Клювиткин А.А., Стародымова Д.П. Геохимия взвешенного вещества в маргинальном фильтре реки Преголи (Балтийское море) // Океанология. 2018. Т. 58, №6. С. 933–947. doi: 10.1134/S0030157418060102.
11. Молчанова Н.С. Основные виды антропогенного воздействия на водосборе р. Преголи // Биологические сообщества реки Преголи (бассейн Вислинского залива, Балтийское море). Калининград, 2013. С. 33–39.
12. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Маркова Л.В., Смирнова А.А. Моделирование фонового гидрохимического режима р. Преголя // Вода: химия и экология. 2012. №11 (53). С. 91–98.
13. Романенко В.И., Сиренко Л.А., Федоровский А.Д. Экологические проблемы Днепра в ретроспективе и на современном этапе // Гидробиологический журнал. 1998. Т. 34, №6. С. 22–35.
14. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М., 2003.
15. Сенин Ю.М., Смыслов В.А., Хлопников М.М. Общая характеристика Вислинского залива // Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа. М., 2004. С. 17–18.
16. Сташко А.В., Александров С.В. Пространственное распределение и сезонная динамика гидрохимических условий в Вислинском заливе Балтийского моря в 2020–2022 гг. // Океанологические исследования. 2023. №51 (1). С. 71–90. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4.
17. Чубаренко Б.В., Двоеглазова Н.В., Боскевич Р.В., Шушарин А.В. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик в зоне смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) и методические подходы к ее изучению // Океанологические исследования. 2024. №52 (1). С. 157–176. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8.
18. Andrulewicz E., Kruk-Dowgiallo L., Osowiecki A. An expert judgment approach to designating ecosystem typology and assessing the health of the Gulf of Gdansk // Managing the Baltic Sea. Coastline Reports. 2004. №2. P. 53–61.
19. 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. Vol. 17, №2. P. 35–49. doi: 10.59887/2073-6673.2024.17(2)-4.
20. Cieslinski R., Chlost I. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea // Baltica. 2017. №30 (2). P. 107–117. doi: 10.5200/baltica.2017.30.12.



21. Domin 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. Vol. 65. P. 269 – 284. doi: 10.1007/698_2017_97.
22. Korobchenkova K.D., Aleksandrov S. V., Semenova A. S. et al. Influence of Hydrometeorological Conditions on the Plankton Distribution in the Estuary of the Pregol River and the Coastal Part of the Baltic Sea // Oceanology. 2023. Vol. 63. Suppl. 1. P. S189 – S202. doi: 10.1134/S0001437023070068.
23. 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. Vol. 62, №4. P. 538 – 555. doi: 10.1016/j.oceano.2020.08.004.
24. 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. Vol. 34. P. 101023. doi: 10.1016/j.rsma.2019.101023.
25. Kruk M., Jaworska B., Jabłomska-Barna I., Rychter A. How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? // Oceanologia. 2016. T. 58, №4. C. 341 – 352. doi: 10.1016/j.oceano.2016.05.004.
26. McLusky D. S., Elliott M. The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management. Oxford University Press. N. Y., 2024. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001.
27. 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. Vol. 53 (3). P. 881. doi: 10.5697/oc.53-3.881.
28. Wasmund N., Andrusaitis A., Lysiak-Pastuszak E. et al. Trophic status of the south-eastern Baltic sea: a comparison of coastal and open areas // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2001. Vol. 53, №6. P. 849 – 864. doi: 10.1006/ecss.2001.0828.
29. Witek Z., Zalewski M., Wielgat-Rychert M. Nutrient stocks and fluxes in the Vistula lagoon at the end of the twentieth century. Slupsk ; Gdynia, 2010.

Об авторе

Сергей Валерьевич Александров — канд. биол. наук, доц., ведущ. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: hydrobio@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9389-6381
SPIN-код: 1467-5765

S. V. Aleksandrov

SPATIAL AND SEASONAL DISTRIBUTION OF NUTRIENTS IN THE ESTUARINE SYSTEM OF THE PREGOLYA RIVER AND THE ADJACENT AREA OF THE BALTIC SEA

Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

Received 09 April 2025

Accepted 18 June 2025

doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-7

To cite this article: Aleksandrov S. V., 2025, Spatial and seasonal distribution of nutrients in the estuarine system of the Pregolya River and the adjacent area of the Baltic Sea, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural Sciences*, №3. P. 99 – 115. doi: 10.5922/vestniknat-2025-3-7.



Seasonal and spatial variations in the content of biogenic elements (mineral forms of nitrogen and phosphorus) are presented for the estuarine system of the Pregolya River (Kalininograd Sea Canal, Kaliningrad Bay) and the coastal zone of the Baltic Sea in 2024. Their seasonal dynamics were characterized by maxima during the high-water period. Minima were observed in spring and summer during water "blooming" against the background of intense water warming. Spatial distribution was characterized by the highest nitrogen and phosphorus concentrations in the estuarine zone, where the Pregolya River inflow occurs. Episodic pollution exceeding the maximum permissible concentrations for ammonium and nitrite nitrogen was recorded in the eastern section of the Kaliningrad Sea Canal, including the area near the Kaliningrad wastewater treatment plant outlets. In winter, concentrations of mineral nitrogen and phosphorus corresponded to a potentially hypertrophic level according to the classification for the Baltic Sea waters, which manifests in the high biological productivity of the Pregolya estuarine system. An increase in phosphorus during summer under low nitrogen concentrations creates conditions for the development of cyanobacteria and water "blooming." The inflow of biogenic substances through the marine strait increases their concentrations in the coastal zone and contributes to the eutrophication of this part of the Baltic Sea.

Keywords: Pregolya River, Kaliningrad Sea Canal, salinity, nitrogen, phosphorus, pollution, trophic status, algal bloom

The author

Dr Sergey V. Aleksandrov, Associate Professor, Leading Researcher, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Russia.

E-mail: hydrobio@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9389-6381

SPIN-код: 1467-5765