

С. В. Александров^{1, 2}, А. В. Сташко³

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА И ЭВТРОФИРОВАНИЯ ВОД

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград, Россия

³ Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», Калининград, Россия

Поступила в редакцию 02.09.2023 г.

Принята к публикации 12.10.2023 г.

doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6

78

Для цитирования: Александров С. В., Сташко А. В. Экологическое состояние Вислинского залива с учетом параметров качества и эвтрофирования вод // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канга. Сер. Естественные и медицинские науки. 2023. №3. С. 78–91. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6.

Вислинский залив – трансграничная лагуна Балтийского моря, которая подвержена значительному загрязнению и эвтрофированию вод. Проведена оценка экологического состояния залива на основе расчета современных российских и зарубежных индексов загрязненности вод за период 2007–2022 гг. Проанализирована многолетняя изменчивость данных параметров как для залива в целом, так и отдельно для четырех районов, характеризующихся специфическими условиями. Наибольший уровень загрязнения вод характерен для восточного района и Приморской бухты. Нормируемый для оценки вод в России индекс УКИЗВ и широко используемый в мире индекс качества вод ССМЕ WQI демонстрировали схожую сезонную и многолетнюю изменчивость. Запуск современных очистных сооружений в 2016 г. привел к значительному снижению загрязнения Приморской бухты, однако в последние годы наблюдается рост загрязнения в восточном районе, куда поступает основной речной сток (с р. Преголи) и где находится новый выпуск очистных сооружений Калининграда. На величину рассчитанных индексов загрязненности вод (УКИЗВ и ССМЕ WQI) влияет уровень эвтрофирования и обилия фитопланктона (по концентрации хлорофилла). Наибольшие величины были в период «цветения» вод залива. Вселение моллюска-фильтратора и вызванные этим изменения в планктоне Вислинского залива отразились на снижении величин индексов загрязненности вод.

Ключевые слова: Вислинский залив, индекс загрязненности, качество воды, эвтрофирование, хлорофилл, очистные сооружения

Введение

Вислинский залив – одна из крупнейших (838 км²) лагун Балтийского моря, характеризующаяся небольшими глубинами (в среднем 2,7 м) и солоноватоводными условиями (до 5–6‰) [8; 11]. Залив относится к трансграничным водоемам, большая его часть (496 км², 61%) расположена в пределах России (Калининградская область). Водосборная территория залива (23 870 км²) находится в густонаселенном районе с раз-



витыми сельским хозяйством и промышленностью. Большие объемы биогенных элементов поступают в восточную часть залива с водосборной площади р. Преголи (в пределах Калининградской области и Варминско-Мазурского воеводства Республики Польша). Значительное загрязняющее влияние оказывает нахождение в восточной части залива Калининградской агломерации с населением >800 тыс. человек [3]. Существенное антропогенное загрязнение залива ранее также определялось отсутствием современных очистных сооружений Калининграда, из-за чего сточные воды, подвергаемые только механической очистке, поступали по коллектору в Приморскую бухту, вследствие этого ряд гидрохимических показателей там устойчиво демонстрировал повышенные уровни в сравнении с остальными гидрологическими районами. Природные условия и многолетнее загрязнение биогенными элементами обусловили формирование в Вислинском заливе эвтрофно-гипертрофной экосистемы, в которой в отдельные периоды наблюдается «цветение» вод [1; 4; 17], а также выраженную пространственную неоднородность гидрохимических и биологических показателей между районами залива [9]. Повышенный уровень загрязнения и эвтрофирования вод Вислинского залива может оказывать влияние на акваторию Балтийского моря, что прослеживается на расстоянии 20–30 км [2].

Мониторинговые исследования загрязнения водных объектов, основанные на определении гидрохимических условий, связаны, как правило, с обработкой крупных массивов данных, полученных за многолетний период для разнотипных районов. С целью получения комплексной оценки применяются индексы загрязненности вод, которые позволяют учитывать несколько индивидуальных гидрохимических параметров в оценке состояния водного объекта. До 2002 г. основным индексом, используемым для оценки состояния поверхностных и морских вод в Российской Федерации, был индекс загрязненности воды (ИЗВ), а с 2002 г. применяют удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) [6]. В других странах также разработаны и применяются гидрохимические индексы, одним из которых является канадский индекс качества воды (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, CCME WQI), введенный в 2001 г. [10]. Данный индекс широко используется для оценки состояния речных и озерных экосистем, прибрежных зон и лагун [15; 16; 19; 20]. В отличие от УКИЗВ расчет индекса CCME WQI позволяет использовать не только гидрохимические показатели, имеющие пределы допустимой концентрации (ПДК), но и другие нормативы, выбор которых зачастую обусловлен специфическими потребностями исследования.

В условиях многофакторного антропогенного воздействия и разнотипных последствий, связанных с эвтрофированием вод Вислинского залива, расчет индексов загрязненности вод способен упростить оценку экологического состояния водоема, которая ранее выполнялась по отдельным гидрохимическим показателям относительно ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Большой массив ежемесячных данных по комплексу гидрохимических показателей дает возможность оценить применимость индексов

загрязненности для характеристики качества и эвтрофирования вод в условиях значительных изменений антропогенного воздействия и трансформации биологических сообществ, наблюдавшихся в Вислинском заливе за последние 15 лет.

Материалы и методы

Массив проанализированных данных был получен в ходе ежемесячного мониторинга Вислинского залива, проводимого в АтлантНИРО с 2007 по 2022 г. Пробы воды отбирали в подповерхностном слое (0–0,5 м) на протяжении безледного периода (март-апрель – ноябрь-декабрь) на 9 стандартных станциях, охватывающих всю российскую акваторию залива. Полученные на мониторинговых станциях значения были усреднены для четырех районов: восточного (станции №1–3), прибалтийского (станции №5, 9, 10), центрального (станции №6, 7) и Приморской бухты (станция №4), которые отличаются физико-географическими и гидрологическими особенностями (рис. 1). Гидрохимические исследования состава вод выполнялись стандартными методами [7].

80

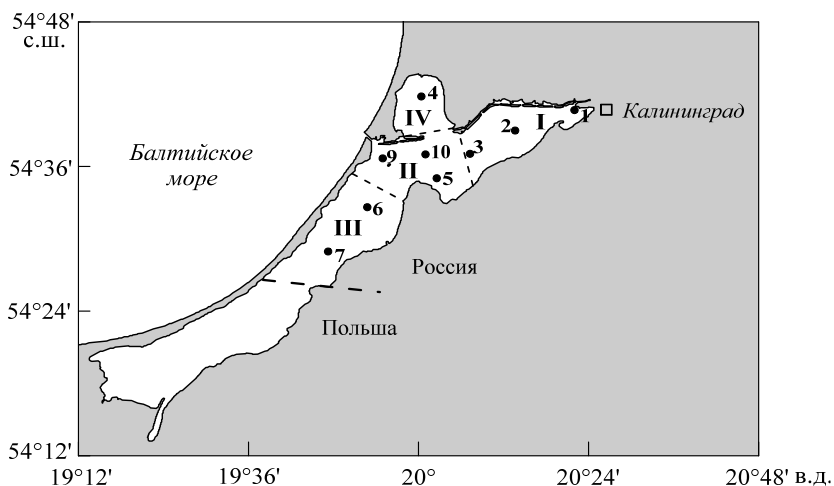


Рис. 1. Расположение станций отбора проб в Вислинском заливе, районы: I – восточный, II – прибалтийский, III – центральный, IV – Приморская бухта

Расчет удельного комбинаторного индекса загрязненности и индекса ССМЕ WQI [6; 10] проводили по следующим показателям: растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода (БПК₅), фосфор фосфатов и аммонийный азот. По этим показателям в Вислинском заливе периодически наблюдалось превышение предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах объектов рыбохозяйственного значения согласно Приказу Минсельхоза РФ от 13.12.2016 №552. Величины ПДК были использованы в качестве пороговых уровней для расчета индексов. Дополнительно на всех станциях определяли хлорофилл «а» экстракционным спектрофотометрическим методом согласно ГОСТ 17.1.04.02-90 [7].



Основными компонентами метода комплексной оценки, используемыми при расчете значений УКИЗВ, являются уровень загрязненности, определяемый по реальным концентрациям загрязняющих веществ и соответствующим им нормативам, а также частота обнаружения превышающих нормативы уровней. Их сочетание (обобщенный оценочный балл) характеризует долю загрязненности, вносимую каждым ингредиентом в общее качество воды, а сумма оценочных баллов, в свою очередь, соответствует значению комбинаторного индекса загрязненности воды (КИЗВ).

Удельный комбинаторный индекс математически определяется как

$$S'_j = \frac{S_j}{N_j}$$

где S'_j – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды в j -м створе, S_j – комбинаторный индекс загрязненности воды в j -м створе, а N_j – число учитываемых в оценке ингредиентов [6].

Расчетные значения УКИЗВ позволяют отнести воды к определенному классу качества (табл.).

Значения индекса CCME WQI получают путем комбинации трех факторов: объема, частоты и амплитуды, что математически определяется как

$$CCME\ WQI = 100 - \left(\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2} \div 1,732 \right),$$

где объем F_1 равен проценту параметров, которые не соответствуют нормативу как минимум один раз в течение рассматриваемого временного интервала относительно общего числа используемых в расчете значений индекса параметров, частота F_2 – процент индивидуальных измерений, которые не соответствуют нормативу относительно общего числа измерений; амплитуда F_3 соответствует величине, на которую вне-нормативные измеренные значения не соответствуют нормативу [10].

Делитель 1,732 нормализует полученные значения к диапазону от 0 до 100, в котором 0 соответствует наихудшему качеству воды, 100 – наилучшему. Остальные значения индекса также позволяют отнести воды к соответствующим категориям качества (табл.).

Характеристика загрязненности вод согласно индексам

| Диапазон значений | Характеристика загрязненности / качества воды |
|--|---|
| <i>Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ)</i> | |
| ≤ 1 | 1-й класс, условно чистая |
| > 1 – 2 | 2-й класс, слабо загрязненная |
| > 2 – 3 | 3-й класс, разряд «а», загрязненная |
| > 3 – 4 | 3-й класс, разряд «б», очень загрязненная |
| <i>Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI)</i> | |
| 94 – 100 | excellent (отличное) |
| 80 – 94 | good (хорошее) |
| 65 – 79 | fair / satisfactory (удовлетворительное) |
| 45 – 64 | marginal / bad (низкое / плохое) |



Многолетнюю динамику УКИЗВ и ССМЕ WQI исследовали путем вычисления значений индекса на основании данных для района (или в среднем на акватории) в течение одного года. Сезонную изменчивость рассчитывали, включая в формулу величины показателей, характеризующие конкретный месяц периода 2007–2022 гг.

Результаты и обсуждение

Для *удельного комбинаторного индекса загрязненности воды* среднегодовые значения в период 2007–2022 гг. в разных районах Вислинского залива варьировались от 1,46 до 3,64. Наиболее высокие величины отмечены в Приморской бухте (1,84–3,64, в среднем 2,37). В других районах величины УКИЗВ были ниже и наблюдалась меньшая изменчивость, которая снижалась последовательно в восточном районе (1,60–2,99, в среднем 2,07), прибалтийском (1,55–2,79, в среднем 1,97) и центральном (1,46–2,12, в среднем 1,86).

УКИЗВ характеризовал состояние вод в разных районах в отдельные годы от «слабо загрязненного» (2-й класс) до «очень загрязненного» (3-й класс, разряд «б») уровней (рис. 2, табл.). В прибалтийском и центральном районах значения преимущественно соответствовали «слабо загрязненным» водам, а в Приморской бухте — «загрязненным». Однократно в 2008 г. в Приморской бухте отмечено «очень загрязненное» состояние (3-й класс, разряд «а»). В среднем за многолетний период в Приморской бухте классифицируемое состояние вод было «загрязненное» (3-й класс, разряд «а»), в прибалтийском — «слабо загрязненное» (2-й класс), в восточном и центральном районах было близким к пограничному между «загрязненным» и «слабо загрязненным» состоянием.

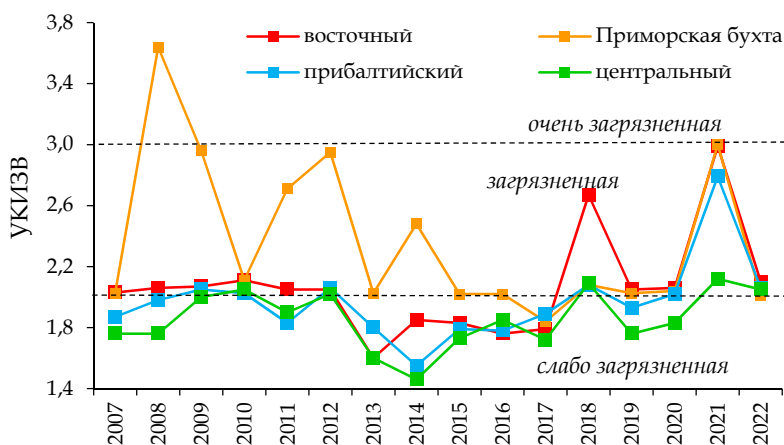


Рис. 2. Многолетняя динамика удельного комбинаторного индекса загрязненности воды в районах Вислинского залива

Особенностью межгодовой динамики значений УКИЗВ в разных районах залива были высокие величины в Приморской бухте в отдель-



ные годы до 2014 г., связанные с поступлением в бухту загрязненных вод слабой очистки из Калининграда до ввода современных очистных сооружений в 2016 г., и, соответственно, периодическое превышение ПДК для аммонийного азота и фосфора фосфатов. Отмеченные пиковые уровни УКИЗВ в центральном и в особенности прибалтийском районах были обусловлены существенным ростом значений БПК₅ в условиях «гиперцветения» вод, а также ростом концентраций минерального фосфора на большей части акватории до уровня выше ПДК. В целом без учета «гиперцветения» летом 2021 г. межгодовая динамика в заливе имела выраженную тенденцию к снижению УКИЗВ в Приморской бухте при сохранении близкого уровня загрязнения в других районах.

Для канадского индекса качества воды (ССМЕ WQI) среднегодовые значения в период 2007–2022 гг. в разных районах Вислинского залива варьировались от 49 до 81. Наибольший диапазон межгодовой изменчивости был в Приморской бухте (от 49 до 81, в среднем 71). В других районах наблюдался меньший диапазон межгодовой изменчивости, а величины ССМЕ WQI возрастали, что соответствует улучшению качества вод от восточного района (от 62 до 79, в среднем 74) до прибалтийского (от 63 до 80, в среднем 76) и центрального (от 73 до 80, в среднем 78) (рис. 3).

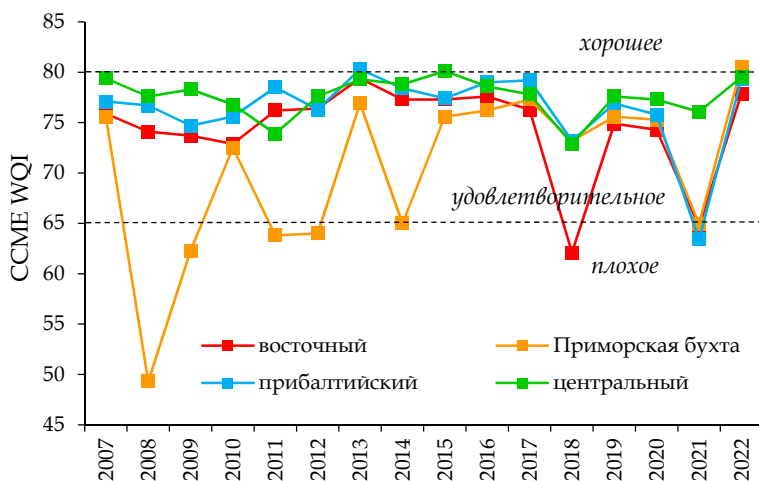


Рис. 3. Многолетняя динамика индекса ССМЕ WQI в районах Вислинского залива

В период исследований ССМЕ WQI характеризовал качество вод на российской акватории залива преимущественно как «удовлетворительное». Только в 2008 г. в Приморской бухте качество вод было «плохим», а также в отдельные годы (2018, 2021) отмечалось пограничное состояние между «плохим» и «удовлетворительным» в Приморской бухте и восточном районе (табл., рис. 3).

Особенностью межгодовой динамики значений ССМЕ WQI в разных районах Вислинского залива было их значительное снижение в Приморской бухте в отдельные годы до 2014 г. В других районах наблюдалась гораздо более сглаженная динамика с близкими величина-

ми. В целом межгодовая динамика данного индекса имела выраженную тенденцию к увеличению в Приморской бухте, что соответствует улучшению качества вод (рис. 3).

Многолетняя динамика значений обоих рассматриваемых показателей состояния вод (УКИЗВ и ССМЕ WQI) в разных районах Вислинского залива характеризовалась сходством межгодовых изменений (рис. 4). Индексы УКИЗВ и ССМЕ WQI хорошо отражали кратковременное локальное загрязнение вод, так как при расчете учитываются показатели, значения которых находятся выше пороговых уровней. В частности, в Приморской бухте, куда до 2016 г. поступали сточные воды слабой очистки из Калининграда и где регистрировались нерегулярные превышения ПДК по аммонийному азоту и фосфатам, отмечался «пиковый» режим индексов УКИЗВ и ССМЕ WQI, то же наблюдали в бухте и в других районах в 2021 г. в условиях летнего «гиперцветения» вод (рис. 2–4). Оба индекса демонстрировали схожую динамику для средних величин, поскольку единственным гидрохимическим показателем, для которого в течение всего многолетнего периода наблюдалось устойчивое превышение средних на акватории значений, было БПК₅ (рис. 4).

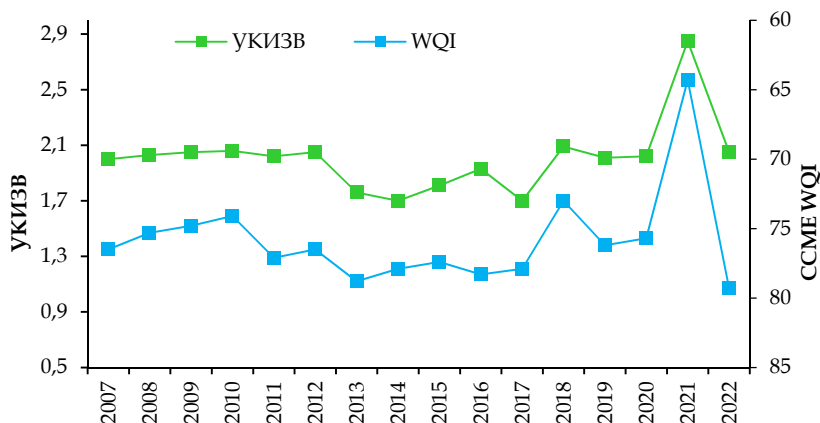


Рис. 4. Динамика индексов УКИЗВ и ССМЕ WQI на российской акватории Вислинского залива в 2007–2022 гг.

Важным фактором многолетнего пространственного распределения биогенной нагрузки на Вислинский залив стал запуск в 2016 г. новой системы очистки сточных вод из Калининграда. Ранее выпуск сточных вод низкой степени очистки был в Приморской бухте, с чем были связаны повышенные концентрации биогенных элементов (с периодическим превышением ПДК по минеральному фосфору, аммонийному азоту) и высокие в сравнении с остальной акваторией индексы загрязненности вод. После ввода очистных сооружений состояние вод по всем исследованным показателям значительно улучшилось и величины УКИЗВ и ССМЕ WQI в Приморской бухте существенно не отличались от остальной акватории (рис. 2, 3).

После периода низких значений в 2018 г. отмечено повышение, которое отразилось на индексах УКИЗВ и ССМЕ WQI, особенно в восточном районе (рис. 2–4); такой пик был связан прежде всего с локальным



загрязнением аммонийным азотом. В последние годы (2019–2022) в заливе вновь наблюдается рост величин УКИЗВ и ССМЕ WQI по сравнению с 2013–2017 гг. Возможно, эта тенденция отражает повышение уровня антропогенного загрязнения при интенсификации сельского хозяйства и промышленности на водосборной территории Вислинского залива (в пределах Калининградской области и Варминско-Мазурского воеводства Республики Польша). Согласно современным оценкам и сценариям хозяйственной деятельности, на водосборе р. Преголи возможно удвоение биогенной нагрузки от антропогенных источников [3]. Такое антропогенное воздействие должно сказаться прежде всего на восточном районе, куда поступает основной речной сток (с р. Преголи) и где с 2016 г. находится выпуск очистных сооружений Калининграда.

Кроме антропогенного загрязнения на индексы загрязненности и качества вод существенное влияние оказывают происходящие сезонные и многолетние изменения в обилии и продуктивности фитопланктона, жизнедеятельность которого отражается на всех учитываемых нами гидрохимических показателях: прежде всего на БПК₅, а также на концентрациях биогенных элементов и растворенного кислорода в воде.

Значения УКИЗВ и ССМЕ WQI и концентрации хлорофилла «а» (как показателя обилия фитопланктона) в Вислинском заливе демонстрировали схожую сезонную изменчивость в период с марта по декабрь 2007–2022 гг. (рис. 5). Их внутригодовая динамика характеризовалась двумя пиками, приходящимися на апрель и июль-август, а также улучшением состояния осенью. Весенний пик соответствует периоду половодья, в результате которого поступление большого количества биогенных элементов приводит к росту их концентраций в самом заливе. Также весной наблюдается весенний пик вегетации фитопланктона из-за отсутствия лимитирования по биогенным элементам, следствием чего является увеличение содержания легкоокисляемых органических соединений в воде (БПК₅).

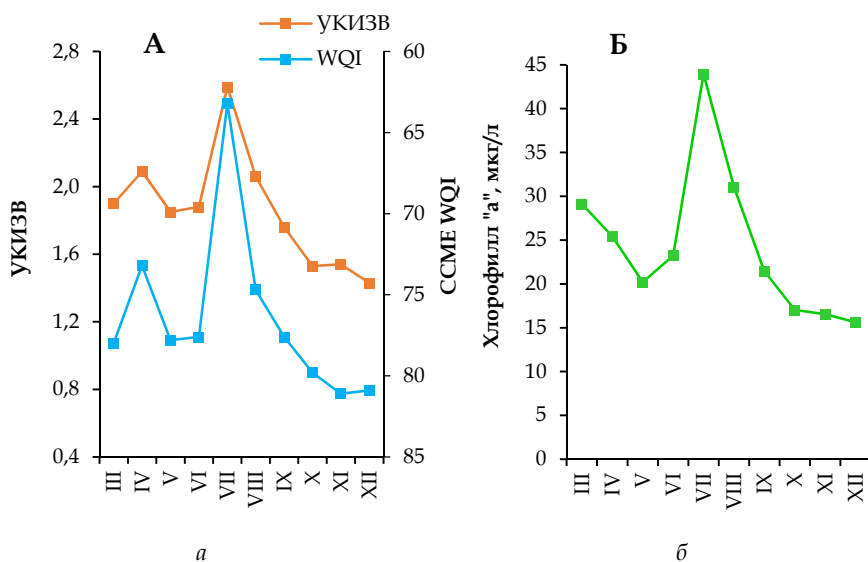


Рис. 5. Сезонная динамика величин УКИЗВ и ССМЕ WQI (а) и хлорофилла «а» (б) на российской акватории Вислинского залива в 2007–2022 гг.



Летом происходит массовое развитие фитопланктона, прежде всего сине-зеленых водорослей, в отдельные годы до уровня «цветения» вод [4; 12; 13]. Концентрация хлорофилла «а» в июле и августе, осредненная за период 2007–2022 гг., составляла 44 и 31 мкг/л, что соответствует эвтрофному состоянию вод (25–75 мкг/л) согласно классификации [18]. В отдельные годы развитие сине-зеленых водорослей может обуславливать «гиперцветение» воды, а концентрация хлорофилла «а» в воде достигать максимальных для водных экосистем величин (до 163 мкг/л в июле 2021 г.). Эвтрофный уровень обилия фитопланктона способствует значительному возрастанию БПК₅ как показателя содержания органического вещества в воде, включая биомассу водорослей. Интенсивная минерализация органического вещества в донных осадках и водной толще в условиях сильного прогрева и ветровое перемешивание ведут к росту концентраций минерального фосфора [9; 11]. В этот период величины УКИЗВ (в среднем 2,59 в июле и 2,06 в августе) соответствовали «загрязненному» состоянию вод. Величина показателя ССМЕ WQI в июле также характеризовалась резким снижением до пограничного (63 в период 2007–2022 гг.) состояния между «удовлетворительным» и «плохим» качеством вод. Осенью обилие и продуктивность фитопланктона значительно снижаются (16–21 мкг/л), что ведет к уменьшению величин БПК₅. В этот период показатели УКИЗВ и ССМЕ WQI демонстрировали значительное снижение загрязненности вод до «слабо загрязненного» уровня и улучшение качества вод до пограничного между «удовлетворительным» и «хорошим» уровнями состояния (рис. 5).

Многолетние гидробиологические и гидрохимические данные, в том числе величины хлорофилла «а», первичной продукции и биогенных элементов, характеризуют Вислинский залив как эвтрофный, а в отдельные годы – гипертрофный водоем [1; 17]. Согласно классификации, широко используемой для оценки трофического состояния вод [18], в 2007–2022 гг. средние за вегетационный период (март – ноябрь) концентрации хлорофилла «а» (29–37, в среднем 34 мкг/л) как показателя обилия фитопланктона в Вислинском заливе соответствовали гипертрофному уровню (>25 мкг/л в среднем) (рис. 6). Такой максимальный для водных экосистем уровень эвтрофирования вод отражал интенсивное развитие фитопланктона (в том числе «цветение» вод летом) в условиях большого поступления и содержания биогенных веществ в воде в этой лагунной экосистеме, что, в частности, отражали индексы УКИЗВ и ССМЕ WQI.

Вселение и массовое развитие моллюска-фильтратора *Rangia cuneata* в 2011 г. оказало сильное воздействие на экосистему Вислинского залива [5; 21]. При увеличении биомассы бентоса до 30 раз (до 800 г/м²) средняя за вегетационный период концентрация хлорофилла «а» в российской части уменьшилась почти в 2 раза (10–27, в среднем 20 мкг/л в 2011–2020 гг.) (рис. 6). Снижение «цветения» сине-зеленых водорослей и концентраций хлорофилла, общего азота и фосфора также наблюдалось в польской части залива [12]. Вселение моллюска-фильтратора повлияло на снижение величин УКИЗВ и ССМЕ WQI в 2013–2017 гг., в том числе из-за значительного уменьшения величин БПК₅ (рис. 4).

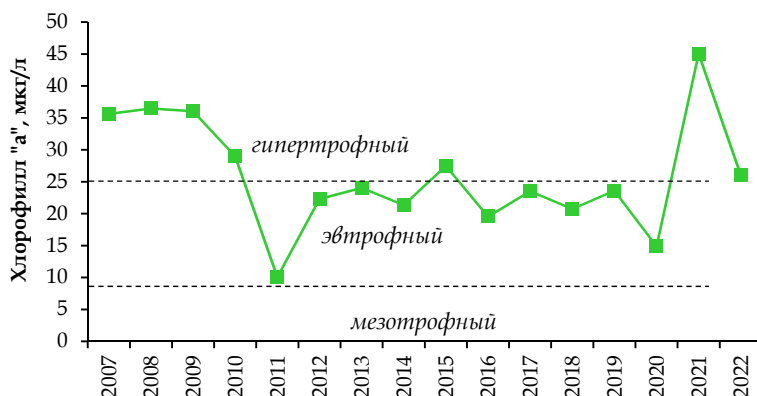


Рис. 6. Динамика хлорофилла «а» на российской акватории Вислинского залива в 2007–2022 гг.

В последние годы в Вислинском заливе вновь наблюдается значительное увеличение количества фитопланктона, в том числе под влиянием климатических условий и, вероятно, из-за снижения бионвазии моллюска *Rangia cuneata*. Исследования хлорофилла «а» показали максимальную за многолетний период величину в июле 2021 г., соответствующую «гиперцветению» вод, которое отразилось на гидрохимических показателях: многократном увеличении БПК₅, концентраций фосфора фосфатов и аммонийного азота [9] и стало следствием максимальных величин УКИЗВ и ССМЕ WQI за период 2007–2022 гг. Влияние «гиперцветения» вод в июле 2021 г. на годовые значения УКИЗВ и ССМЕ WQI свидетельствует о значительной зависимости индексов загрязненности и качества вод от функционирования биологических компонентов (фитопланктон, зообентос) в лагунной экосистеме Вислинского залива.

Повышенный уровень загрязнения и эвтрофирования вод Вислинского залива может оказывать значимое влияние на прилегающую акваторию Гданьского бассейна Балтийского моря. В условиях интенсивного водообмена через морской пролив часть образованного фитопланктоном избыточного органического вещества и поступающих в залив загрязняющих веществ выносятся в прибрежную акваторию Балтийского моря, способствуя ее загрязнению и эвтрофикации. Согласно спутниковым наблюдениям, интенсивный вынос вод Вислинского залива с повышенным содержанием взвеси и хлорофилла «а» распространяется в море на расстояние до 20–30 км [2]. Такой вынос, в частности, был зарегистрирован в июле 2021 г., когда в Вислинском заливе наблюдалось максимальное за последние годы «гиперцветение» воды из-за развития сине-зеленых водорослей, которое также было хорошо отображено на снимках спутникового сканера Sentinel [2]. Как указывалось выше, в этот период в заливе происходило многократное увеличение величин хлорофилла «а» до гипертрофного уровня и ухудшение показателей УКИЗВ до «загрязненного» состояния и ССМЕ WQI до



«плохого» качества вод. В открытой акватории Балтийского моря концентрация хлорофилла «а» была на порядок меньше, чем в Вислинском заливе, но увеличивалась в этот период до 8 мкг/л, что близко к максимальным летним величинам, соответствующим эвтрофному состоянию морских вод. Гданьский бассейн, который подвергается влиянию загрязненного стока из Вислинского залива и Вислы, относится к наиболее эвтрофированным районам Балтийского моря [14].

Заключение

88

Вислинский залив — трансграничная лагуна Балтийского моря, которая подвержена значительному загрязнению из различных антропогенных источников, включая Калининградскую агломерацию, и характеризуется высоким уровнем эвтрофирования и периодическим «цветением» вод. По данным ежемесячных исследований АтлантНИРО в 2007–2022 гг. выполнен расчет индексов загрязненности (УКИЗВ) и качества (ССМЕ WQI) вод на всей российской акватории и отдельно для четырех районов (восточного, прибалтийского, центрального и Приморской бухты), отличающихся условиями среды и загрязнением вод. Индексы УКИЗВ и ССМЕ WQI хорошо отражают кратковременное локальное загрязнение с превышением ПДК, в частности, это было показано для Приморской бухты, куда ранее (до 2016 г.) поступали малоочищенные сточные воды Калининграда.

Нормируемый для оценки вод в России индекс УКИЗВ и широко используемый в мире индекс качества вод ССМЕ WQI демонстрировали схожую сезонную и многолетнюю изменчивость, что свидетельствует о потенциальной сравнимости оценок, получаемых в России, с другими странами.

Запуск современных очистных сооружений в 2016 г. привел к значительному снижению загрязнения Приморской бухты, однако в последние годы наблюдается рост уровня загрязнения в восточном районе, куда поступает основной речной сток (с р. Преголи) и где находится новый выпуск очистных сооружений Калининграда.

На величину рассчитанных индексов загрязненности (УКИЗВ и ССМЕ WQI) влияет уровень эвтрофирования вод и обилия фитопланктона (по концентрации хлорофилла). Сезонная динамика характеризовалась двумя пиками, приходящимися на апрель и июль-август, что во многом связано с интенсивным развитием водорослей в этот период. Многолетняя динамика параметров загрязненности и качества вод (УКИЗВ и ССМЕ WQI) характеризуется повышенными величинами в период наиболее эвтрофного состояния и «цветения» вод, в частности, резкое ухудшение состояния отмечено в период летнего «гиперцветения» вод залива в 2021 г. Вселение моллюска-фильтратора и вызванные этим изменения в планктоне Вислинского залива отразились на снижении величин УКИЗВ и ССМЕ WQI в 2013–2017 гг. Как следствие, при оценке экологического состояния лагунной экосистемы Вислинского



залива необходимо учитывать влияние функционирования биологических компонентов (планктон, бентос) на параметры, характеризующие загрязнение и качество вод.

Исследования многолетней динамики выполнены в рамках госзадания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2021-0012), оценка влияния биопродуктивности вод – госзадания БФУ им. И. Канта FZWM-2023-0004.

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. Горбунова Ю. А., Чубаренко Б. В., Домнин Д. А. Биогенная нагрузка на водосборный бассейн реки Преголи от антропогенных источников // Известия КГТУ. 2017. №47. С. 34–45.

4. Дмитриева О. А., Семенова А. С. Сезонная динамика и трофические взаимоотношения фито- и зоопланктона в Вислинском заливе Балтийского моря // Океанология. 2012. Т. 52, №6. С. 851.

5. Науменко Е. Н., Рудинская Л. В., Гусев А. А. Влияние видов-вселенцев на структуру зоопланктона и зообентоса в Вислинском заливе Балтийского моря // Региональная экология. 2014. №1–2 (35). С. 21–28.

6. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

7. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М. : ВНИРО, 2003.

8. Сенин Ю. М., Смыслов В. А., Хлопников М. М. Общая характеристика Вислинского залива // Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа. М. : Научный мир, 2004. С. 17–18.

9. 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.

10. CCME Water Quality Index user's manual 2017. Update. URL: <https://ccme.ca/en/res/wqmanualen.pdf> (дата обращения: 20.09.2023).

11. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula lagoon // Ecology of Baltic coastal waters. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2008. P. 167–195. doi: 10.1007/978-3-540-73524-3_8.

12. Kownacka J., Całkiewicz J., Kornijów 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.

13. Kruk M., Jaworska B., Jablonska-Barna I., Rychter A. How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? // Oceanology. 2016. Vol. 58, №4. P. 341–352. doi: 10.1016/j.oceano.2016.05.004.

14. 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. Vol. 59, №1. P. 49–65. doi: 10.1134/S0001437019010077.



15. Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada // Environmental Monitoring and assessment. 2006. №113. P. 411–429. doi: 10.1007/s10661-005-9092-6.
16. Miyittah M.K., Tulashie S.K., Tsyawo F.W. et al. Assessment of surface water quality status of the Aby Lagoon System in the Western Region of Ghana // Heliyon. 2020. Vol. 6, №7. P. e04466. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04466.
17. 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. <https://doi.org/10.5697/oc.53-3.881>.
18. OECD: Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. P., 1982.
19. Panagopoulos Y., Alexakis D.E., Skoulikidis N.T. et al. Implementing the CCME water quality index for the evaluation of the physicochemical quality of Greek rivers // Water. 2022. Vol. 14, №17. P. 2738. doi: 10.3390/w14172738.
20. Teshome F.B. Seasonal water quality index and suitability of the water body to designated uses at the eastern catchment of Lake Hawassa // Environmental science and pollution research. 2020. Vol. 27, №1. P. 279–290. doi: 10.1007/s11356-019-06794-4.
21. Warzocha J., Drgas A. The alien gulf wedge clam (*Rangia cuneata* G.B. Sowerby I, 1831) (Mollusca: Bivalvia: Mactridae) in the Polish part of the Vistula Lagoon (SE. Baltic) // Folia Malacologica. 2013. №21 (4). P. 291. <https://doi.org/10.12657/folmal.021.030>.

Об авторах

Сергей Валерьевич Александров — канд. биол. наук, доц., зав. лабораторией, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: hydrobio@mail.ru

Андрей Владимирович Сташко — ст. инженер, Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», Россия.

E-mail: hidanstashko@gmail.com

S. V. Aleksandrov^{1,2}, A. V. Stashko³

THE ECOLOGICAL STATE OF THE VISTULA LAGOON USING INDICATORS OF WATER QUALITY AND EUTROPHICATION

¹ Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

³ Atlantic branch of the "VNIRO", Kaliningrad, Russia

Received 2 September 2023

Accepted 12 October 2023

doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-6

To cite this article: Aleksandrov S. V., Stashko A. V., 2023, The ecological state of the Vistula lagoon using indicators of water quality and eutrophication, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №3. P. 78–91. doi: 10.5922/gikbfu-2023-3-5.



The Vistula Lagoon is a transboundary lagoon of the Baltic Sea that is subject to significant pollution and water eutrophication. An assessment of the ecological condition of the lagoon was conducted based on the calculation of modern Russian and foreign water pollution indices for the period 2007–2022. The long-term variability of these parameters was analyzed for the lagoon as a whole and separately for four regions characterized by specific conditions. The highest level of water pollution is characteristic of the eastern region and the Primorskaya Bay. The Russian Water Quality Index (SCWPI) and the widely used world index, the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI), demonstrated similar seasonal and long-term variability. The launch of modern treatment facilities in 2016 led to a significant reduction in pollution in the Primorskaya Bay. However, in recent years, an increase in pollution has been observed in the eastern region, where the main river runoff (from the Pregolya River) enters and where the new discharge of Kaliningrad's treatment facilities is located. The level of eutrophication and phytoplankton abundance (chlorophyll concentration) influences the calculated water pollution indices (SCWPI and CCME WQI). The highest values were observed during the period of "water bloom" in the lagoon. The introduction of filter-feeding mollusks and the resulting changes in the plankton of the Vistula Lagoon have contributed to the reduction of water pollution indices.

Keywords: Vistula Lagoon, pollution index, CCME WQI, water quality, eutrophication, chlorophyll, wastewater treatment facility

The authors

Dr Sergey V. Aleksandrov, Head of the Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Russia.

E-mail: hydrobio@mail.ru

Andrey V. Stashko, Atlantic Branch of the FSBSI «VNIRO», Russia.

E-mail: hidanstashko@gmail.com