

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ВИСЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2020–2022 гг.

А. В. Сташко¹, С. В. Александров^{1,2}

¹ *Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО»,
Россия, 236022, Калининград, ул. Дм. Донского, д. 5,
e-mail: hydrobio@mail.ru;*

² *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: hydrobio@mail.ru*

Для изучения современных гидрохимических условий в Вислинском заливе и тенденции их изменения в условиях меняющегося антропогенного воздействия в 2020–2022 гг. были исследованы сезонная изменчивость и пространственное распределение гидрохимических показателей (солености, рН, растворенного кислорода, БПК₅, минеральных форм фосфора и азота). Водоем подвержен интенсивному антропогенному воздействию из Калининградской агломерации, характер которого претерпел качественные изменения в последние годы, поэтому был проведен сравнительный анализ с периодом 2007–2016 гг., который предшествовал запуску современных очистных сооружений г. Калининграда. Вислинский залив характеризуется пространственной изменчивостью гидрохимических и гидрологических условий, которая рассмотрена для четырех разнотипных районов (восточного, прибалтийского, центрального районов и Приморской бухты). Воздействие антропогенных факторов на динамику гидрохимических условий в наибольшей степени оказало влияние на восточный район и Приморскую бухту. На восточный район залива приходится основное поступление биогенных элементов с водосбора (р. Преголя), а с 2016 г. здесь находится выпуск сточных вод из Калининграда. В сравнении с периодом до 2016 г., в восточном районе фиксировали значительный рост БПК₅, снижение концентраций растворенного кислорода, многократное превышение азота нитритов и нитратов в сравнении с остальной акваторией. В Приморской бухте, куда до 2016 г. поступали сточные воды низкой степени очистки из г. Калининграда, в 2020–2022 гг. загрязнение по большинству исследуемых показателей (БПК₅, фосфор фосфатов, аммонийный азот) снизилось и соответствовало средним по акватории величинам. Прибалтийский и центральный районы находятся под сильным воздействием природных условий (заток морских вод), в них в 2020–2022 гг., как и в предыдущий период, наблюдались более низкие концентрации биогенных элементов из-за удаленности от основных источников загрязнения. Несмотря на снижение в 2020–2022 гг. интенсивности локального загрязнения в Приморской бухте, концентрации минеральных форм биогенных элементов сохранялись на высоком уровне, обеспечивая интенсивное развитие водорослей (в том числе рост БПК₅) и эвтрофирование залива.

Ключевые слова: загрязнение, биогенные элементы, кислородный режим, соленость, очистные сооружения, Вислинский залив

Введение

Вислинский залив – одна из крупнейших (838 км²) лагун Балтийского моря. Залив мелководен со средней глубиной 2.7 м, отделен от моря песчаной косой, южная часть которой имеет длину 55 км, северная – 11 км. Водообмен с морем происходит через пролив, расположенный у г. Балтийска (Chubarenko, Margonski, 2008).

Гидрохимические и гидрологические условия обусловили формирование в заливе эвтрофной экосистемы. В отдельные годы, когда наблюдается «цветение» вод при развитии синезеленых водорослей, она достигает в летний период гипертрофного состояния (Александров, 2022; Aleksandrov, 2010). Одной из ключевых особенностей гидрологического режима залива является многократное преобладание водообмена с Балтийским морем над речным стоком – 17.0 км³/год и 3.7 км³/год соответственно, 41 % которого приходится на р. Преголю (Силич, 1971; Chubarenko, Margonski, 2008). Большие объемы минеральных форм биогенных элементов поступают в восточную часть залива с водосборной площади р. Преголя (в пределах Калининградской области и Варминско-Мазурского воеводства Республики Польша) (Александров, Горбунова, 2010; Горбунова и др., 2017). Существенное антропогенное загрязнение залива ранее также определялось отсутствием современных очистных сооружений г. Калининграда. Сточные воды, подвергаемые только механической очистке, поступали по коллектору в Приморскую бухту, вследствие чего ряд гидрохимических показателей там устойчиво демонстрировал повышенные уровни в сравнении с остальными гидрологическими районами (Александров, 2014, 2018; Александров и др., 2017; Богданов и др., 2019). Эксплуатируемые с 2016 г., современные очистные сооружения предусматривают улучшение технологий и степени очистки вод. Также важным следствием запуска очистных сооружений стал перенос выпуска в участок Калининградского морского канала, расположенный в восточном районе.

Многолетние гидрохимические исследования Вислинского залива позволяют оценивать состояние водоема в условиях изменяющегося антропогенного воздействия. Ранее было показано, что, несмотря на отсутствие локального загрязнения в отдельных районах, концентрации минеральных форм биогенных элементов в 2019 г. сохранялись на уровнях, которые предшествовали запуску очистных сооружений (Александров, Сташко, 2021). Исследования в 2020–2022 гг. на всей российской акватории Вислинского залива позволяют рассмотреть сезонную и пространственную изменчивость гидрохимических условий и тенденцию их изменения после ввода в эксплуатацию очистных сооружений Калининграда.

Материалы и методы

Экспедиционные исследования в Вислинском заливе выполнялись ежемесячно или ежесезонно с марта по декабрь 2020–2022 гг. на 9-ти стандартных станциях, расположенных в разных гидрологических районах: восточном (станции 1, 2, 3),

Приморской бухте (станция 4), прибалтийском (станции 5, 9, 10), центральном (станции 6, 7), согласно принятой ранее схеме деления (Александров, 2014; Александров и др., 2017). Пробы воды отбирали в подповерхностном слое (0–0.5 м). Всего в 2020–2022 гг. было проведено 15 съемок, выполнено по 127 химических анализов по каждому исследуемому показателю стандартными методами (Руководство, 2003). Перечень показателей включал растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода (БПК₅), водородный показатель (рН), минеральные формы биогенных элементов (фосфор фосфатов, аммонийный азот, азот нитритов и азот нитратов), водородный показатель (рН). Определение растворенного кислорода проводили йодометрическим методом (метод Винклера). Температуру (°С) и соленость (‰) воды определяли в момент отбора многопараметрическим зондом AquaRead AP-5000. Загрязнение вод Вислинского залива оценивали по нормативам предельно допустимых концентраций вредных веществ в водных объектах рыбохозяйственного значения, согласно Приказу Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552.

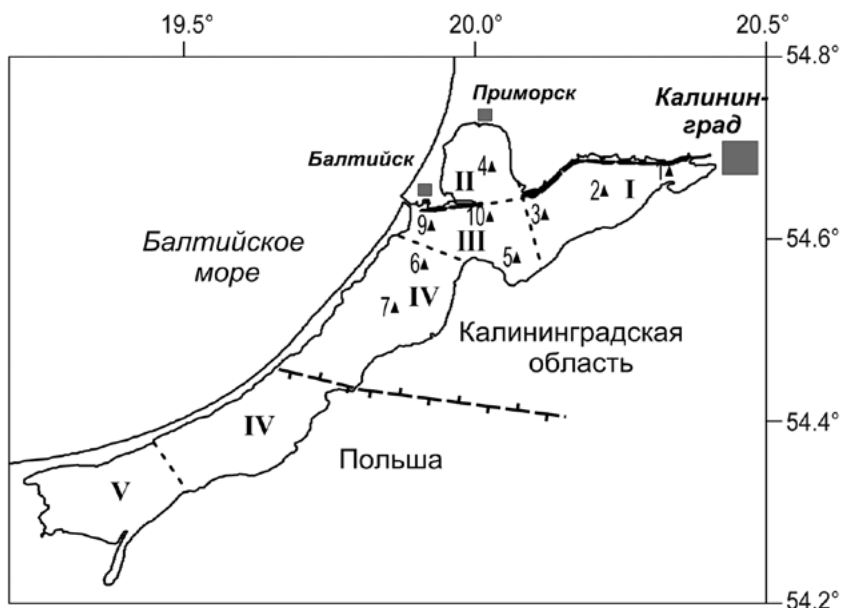


Рис. 1 – Расположение станций мониторинга и условные границы районов в Вислинском заливе (I – восточный район, II – Приморская бухта, III – прибалтийский район, IV – центральный район, V – Эльблонгский район)

Результаты

Соленость воды, рН

Вислинский залив можно считать сильно опресненным морским водоемом. Соленость вод на российской акватории Вислинского залива в 2020–2022 гг. характеризовалась минимальными величинами в весенний период, а летом преимущественно была выше 4 ‰. Максимум солености наблюдали в ноябре, когда средние

по акватории значения составляли 4.9–5.3 ‰. В целом, сезонная изменчивость соответствовала многолетней динамике (Александров и др., 2017; Александров, 2018).

В восточном районе, где существенное влияние оказывает сток р. Преголи, соленость была устойчиво ниже, чем в других районах: 3.9 ‰ в среднем за 2020–2022 гг. при диапазоне в других районах 4.6–5.2 ‰. Весной, в условиях более интенсивного речного стока, различия возрастали – 3.2 и 4.3–5.1 ‰. Осенью, в период затoka морских вод, распространяющихся до восточного района, различия между районами уменьшались. Наибольшая соленость была в центральном районе (до 5.9–6.0 ‰) (таблица 1).

Средние по акватории значения водородного показателя в 2020–2022 гг. варьировали от 8.1 до 9.2. Сезонная динамика соответствовала многолетнему ходу (Сенин, 2004): после весенне-летнего периода (8.6–9.2 рН) с интенсивным развитием фитопланктона происходило снижение показателя до 8.1–8.2 в конце вегетационного периода (ноябрь). Пространственная изменчивость между отдельными районами, как правило, не превышала 0.1–0.2 рН. В июле 2021 г., в условиях сильного «цветения» вод, диапазон рН между районами возрос: в восточном районе и Приморской бухте (8.9) значения рН были ниже, чем в центральном (9.5) и прибалтийском (9.4) районах.

Кислородный режим и биохимическое потребление кислорода

Динамика содержания растворенного кислорода в 2020–2022 гг., в целом, соответствовала естественному гидрологическому ходу. Максимумы концентраций наблюдали весной (до 11.9–12.9 мгО/дм³ в среднем по акватории) в период низких температур воды, последующее снижение происходило с прогревом вод и уменьшением растворимости кислорода. Осенью концентрации кислорода вновь возрастали.

Среднее содержание растворенного кислорода в 2020–2022 гг. в восточном районе было ниже, чем в других районах: 10.8 и 11.4–11.7 мгО/дм³. Различия в концентрациях между районами были наиболее выражены летом (диапазон составлял 8.8–10.6 мгО/дм³), а наименее – осенью (11.4–11.9 мгО/дм³). В июле 2021 г. содержание растворенного кислорода в восточном районе (6.6 мгО/дм³) было в 2 раза ниже, чем в прибалтийском (12.6 мгО/дм³); разница между станцией № 1 восточного района, подвергавшегося загрязнению из г. Калининграда и с водосбора р. Преголи, и станцией № 10 прибалтийского района была более, чем трехкратной (5.0 и 15.4 мгО/дм³).

Степень насыщения вод кислородом в 2020–2022 гг. преимущественно была близка или превышала 100 %. Пики насыщения отмечались весной и летом, средние по акватории достигали 108–122 %. Различия между районами соответствовали распределению концентраций растворенного кислорода: степень насыщения в восточном районе в среднем (98 %) была ниже, чем в остальной части (106–110 %). Низкому содержанию растворенного кислорода в восточном районе в августе 2020 г. и июле 2021 г. соответствовало насыщение 89 % и 79 %. В июле 2021 г. отмечено нетипичное для последних лет «гиперцветение» синезеленых водорослей, при котором

концентрации хлорофилла «а» были 51–310 мг Хл/дм³ (уровень «гиперцветения» > 100 мкг/л), а первичная продукция – 5.4–10.0 гС/(м³·сут). Как следствие очень интенсивного фотосинтеза в центральном и прибалтийском районах насыщение вод достигало 144 и 156 (до 194 % на отдельных станциях).

Таблица 1 – Гидрохимические показатели в районах Вислинского залива в 2020–2022 гг.

Год	Месяц	Соленость, ‰				Кислород, мг/дм ³				Кислород, % насыщения			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2020	март	3.5	4.9	4.7	5.5	12.5	13.3	13.2	12.6	98	105	106	100
	апрель	4.1	4.7	5.1	6.0	11.9	12.5	12.2	11.5	107	111	110	103
	июнь	4.1	4.9	4.8	5.3	10.1	10.6	10.5	10.5	107	115	113	113
	август	4.6	4.9	5.1	5.1	7.7	9.1	9.2	8.2	89	105	108	95
	ноябрь	4.8	4.9	5.1	5.2	10.7	11.1	11.5	11.1	96	101	105	102
2021	апрель	2.7	3.6	3.8	4.1	12.5	13.3	12.6	12.6	102	113	107	106
	июль	3.5	4.3	4.7	4.8	6.6	8.7	12.6	11.8	79	108	156	144
	ноябрь	4.9	5.1	5.4	5.9	11.6	11.6	11.6	11.3	94	97	99	97
2022	апрель	2.6	3.9	3.6	4.6	12.4	12.6	12.8	12.8	100	103	103	104
	июль	3.8	4.1	3.9	–	10.5	10.0	10.1	–	117	113	112	–
	ноябрь	4.2	5.2	5.1	5.1	12.3	12.9	12.6	12.6	94	98	97	99
Год	Месяц	БПК ₅ , мг/дм ³				Водородный показатель, ед. рН				Фосфор фосфатов, мкгР/дм ³			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2020	март	5.2	5.5	4.7	3.5	8.6	8.5	8.7	8.5	4	2	42	3
	апрель	6.3	6.7	5.4	4.0	8.6	8.7	8.7	8.6	39	5	5	20
	июнь	5.8	5.2	4.5	3.5	8.6	8.7	8.7	8.6	5	2	2	2
	август	4.3	3.8	4.6	5.4	8.4	8.8	8.6	8.8	47	49	51	43
	ноябрь	4.3	2.9	3.5	2.8	8.1	8.1	8.2	8.3	2	3	4	5
2021	апрель	6.9	6.4	4.9	5.6	9.1	9.0	8.8	8.7	9	1	2	2
	июль	5.1	6.4	12.5	9.9	8.9	8.9	9.4	9.5	293	301	202	170
	август	–	–	–	–	–	–	–	–	14	14	25	27
	ноябрь	4.4	2.9	3.3	3.4	8.2	8.2	8.2	8.1	21	19	16	16
	декабрь	–	–	–	–	–	–	–	–	24	15	15	15
2022	март	–	–	–	–	–	–	–	–	27	14	14	18
	апрель	7.3	5.0	6.1	5.6	9.0	8.9	9.0	8.9	14	10	10	11
	май	–	–	–	–	–	–	–	–	30	28	25	21
	июнь	–	–	–	–	–	–	–	–	54	25	19	21
	июль	6.8	4.8	5.6	–	9.2	9.1	9.1	–	20	19	24	–
	ноябрь	4.0	3.3	3.7	3.8	8.1	8.1	8.2	8.2	31	12	12	8
Год	Месяц	Аммонийный азот, мкгN/дм ³				Азот нитритов, мкгN/дм ³				Азот нитратов, мкгN/дм ³			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
2020	март	47	12	6	7	9	7	5	4	238	80	74	89
	апрель	73	34	162	180	9	7	5	5	148	86	104	89
	июнь	39	10	22	5	3	2	2	2	8	6	59	19
	август	39	48	42	48	8	7	8	10	53	49	55	46
	ноябрь	41	36	30	25	8	14	9	10	31	30	35	23
2021	апрель	21	15	13	11	15	14	10	6	684	616	536	457
	июль	76	14	82	43	11	6	7	5	39	17	11	10
	август	43	24	53	172	9	2	3	3	42	6	4	5
	ноябрь	31	29	27	5	2	3	2	2	25	5	19	20
	декабрь	85	43	65	56	8	2	6	3	302	123	148	163
2022	март	24	31	27	80	74	39	20	26	941	521	527	462
	апрель	30	28	32	27	5	3	5	3	584	383	449	342
	май	51	39	29	44	9	5	5	4	36	9	7	4
	июнь	27	19	12	12	20	2	2	2	224	4	1	3
	июль	32	31	12	–	1	2	2	–	3	2	1	–
	ноябрь	97	17	41	39	12	4	8	8	141	52	42	67

Примечание: I – восточный район, II – Приморская бухта, III – прибалтийский район, IV – центральный район.

Сезонная динамика значений БПК₅ с 2020 по 2022 гг. в Вислинском заливе имела значительную межгодовую изменчивость. В 2020 гг. максимум наблюдали в апреле, летний пик значений был менее выраженным; средние по акватории значения составили соответственно 5.6 и 4.5–4.8 мг/дм³. В 2021 г. максимум пришелся на июль и составил 8.5 мг/дм³. В 2022 г. апрельские и июльские значения были близки (5.7–6.0 мг/дм³). Осенью в заливе происходило снижение значений БПК₅ до 3.4–3.7 мг/дм³.

Средняя величина БПК₅ в 2020–2020 гг. в восточном, прибалтийском, центральном районах и Приморской бухте составила 5.5, 5.3, 4.7 и 4.8 мг/дм³. Максимальные величины весной и осенью наблюдали в восточном районе, летом – в центральном и прибалтийском.

Фосфор фосфатов

Сезонная динамика содержания фосфора фосфатов в Вислинском заливе в 2020–2022 гг. характеризовалась значительной межгодовой изменчивостью весенних значений (март и апрель, 4–19 мкгР/дм³ в среднем по акватории). В 2020 г. весной наблюдали наибольший диапазон от локальных максимумов 42 и 39 мкгР/дм³ в прибалтийском и восточном районах в марте и апреле при минимуме (2–5 мкгР/дм³) на остальной акватории. Пик значений наблюдали летом, что соответствовало многолетней динамике: в августе 2020 г., июле 2021 г., июне 2022 г. – средние по акватории значения составили 48, 236 и 30 мкгР/дм³. Осенью 2020–2022 гг. концентрации минерального фосфора в среднем по российской акватории не поднимались выше 18 мкгР/дм³.

Особенностью пространственного распределения фосфора фосфатов в 2020–2022 гг. были повышенные значения в восточном районе. Среднее за 2020–2022 гг. содержание в восточном районе и Приморской бухте составило 40 и 32 мкгР/дм³, центральном и прибалтийском – 25 и 29 мкгР/дм³. Летом различия между районами были более значительны: 72, 68 и 52, 54 мкгР/дм³ соответственно.

Минеральные формы азота (аммонийный, азот нитратов, нитритов)

В Вислинском заливе ежегодно наблюдается ранневесенний максимум концентраций азота нитратов, обусловленный паводковым поступлением биогенных элементов с водосбора. В 2021 и 2022 гг. средние по акватории концентрации весной достигали 576–650 мкгN/дм³, в 2020 г. пик был менее выражен – 113–133 мкгN/дм³. В последующие месяцы происходило резкое снижение до минимальных годовых уровней, связанное с интенсивным развитием фитопланктона в летние месяцы (27 мкгN/дм³ в июне 2020 г., 19 мкгN/дм³ в августе 2021 г., 3 мкгN/дм³ в июле 2022). Осенью характерно сезонное увеличение азота, связанное со снижением вегетации фитопланктона и началом зимней аккумуляции (Александров и др., 2017; Александров, 2018). Рост значений азота нитратов

не наблюдали вплоть до поздней осени, средние по акватории значения в ноябре 2020–2021 гг. составили 30 мкгN/дм³ и 19 мкгN/дм³, а в ноябре 2022 г. при раннем начале заморозков содержание достигло 87 мкгN/дм³. Значительное увеличение наблюдалось с началом зимнего периода – до 184 мкгN/дм³ в декабре 2021 г. Среднее за 2020–2022 гг. содержание азота нитратов в восточном районе почти двукратно превышало уровни в остальной части акватории: 219 и 120–130 мкгN/дм³. Повышенные величины наблюдали не только весной, но и летом – различия концентраций были более значительными (62 и 14–22 мкгN/дм³). В частности, в июне 2022 г. содержание азота нитратов в восточном районе составило 224 мкгN/дм³ при минимальных концентрациях 1–4 мкгN/дм³ в других районах.

Динамика концентраций аммонийного азота в меньшей степени подвержена сезонным изменениям; повышенные уровни, связанные с процессами разложения органического вещества (как правило, фитопланктона), могут наблюдаться в марте–апреле, летом и в октябре–ноябре (Александров, 2018). В 2020 г. максимальное содержание аммонийного азота фиксировали в апреле (122 мкгN/дм³ в среднем по акватории), что могло быть связано с разложением органического вещества, поступившего весной во время паводка, в 2021 г. – в августе (73 мкгN/дм³), после интенсивного «цветения» вод в июле. Также высокие величины наблюдались в конце вегетационного периода в декабре 2021 г. и ноябре 2022 г. (62 и 49 мкгN/дм³). Содержание аммонийного азота в восточном, прибалтийском, центральном районах и Приморской бухте в 2020–2022 гг. в среднем составило 47, 41, 50, 27 мкгN/дм³. Пространственное распределение характеризовалось очень высокими величинами на отдельных станциях в сравнении с остальной акваторией, что могло быть связано с локальным загрязнением от ближайших антропогенных источников. Локальные максимумы отмечены во все сезоны. В частности, в ноябре 2022 г. на станции № 1 у устья р. Преголи и в районе выпуска очистных сооружений концентрация аммонийного азота (152 мкгN/дм³) двукратно превысила уровень на остальной акватории.

Концентрации азота нитритов в 2020–2022 гг. преимущественно были ниже 10 мкгN/дм³. Очень высокое содержание наблюдалось только в марте 2022 гг. (41 мкгN/дм³) в период весеннего половодья. Обычно между районами не наблюдали значительных различий. Исключением были март и июнь 2022 г., когда в восточном районе наблюдались в несколько раз более высокие величины, чем в остальных, что могло быть обусловлено антропогенным загрязнением. Среднее за 2020–2022 гг. содержание в восточном районе составило 13 мкгN/дм³, а в других районах было 6–7 мкгN/дм³.

Обсуждение

Гидрохимические условия в Вислинском заливе характеризуются значительной сезонной динамикой, связанной с гидрологическими условиями, биологическими процессами и различному по интенсивности, в зависимости от сезона, поступлению биогенных элементов с водосборной территории (Александров и др., 2017;

Александров, 2018; Сенин, 2004; Aleksandrov, 2010). Залив, из-за мелководности, имеет вертикальную однородность гидрологических и гидрохимических условий; сильные отклонения могут происходить в центральной части в период интенсивного затока морских вод (Журавлева, Тшосиньска, 1971). Пространственная изменчивость обусловлена геоморфологическими особенностями, влиянием речного стока и водообменом с Балтийским морем, а также антропогенным загрязнением (Chubarenko, Margonski, 2008).

В условиях растущего антропогенного воздействия (Горбунова и др., 2017) и климатических колебаний в юго-восточной части Балтийского моря (Стонт и др., 2020) в гидрохимическом режиме мелководной лагуны могут происходить значительные изменения, которые будут отличаться в разных районах Вислинского залива, что обусловлено гидрологическими условиями (поступление морских вод, речной сток и т.д.).

Восточный район

Восточный район Вислинского залива мелководен, имеет в качестве одной из границ устье р. Преголи, вследствие чего испытывает сильное влияние речного стока, в том числе загрязнение с водосбора и опреснение вод весной (Горбунова и др., 2017; Chubarenko, Margonski, 2008). На побережье расположена Калининградская агломерация, где сосредоточено более 70 % жителей и до 90 % промышленного производства Калининградской области. С 2016 г. в восточном районе находится выпуск сточных вод из Калининграда.

Многолетняя динамика с 2007 г. концентраций растворенного кислорода в восточном районе так же, как и на остальной акватории, характеризуется снижением абсолютных значений в вегетационный период, на что может влиять увеличение температуры воздуха в юго-восточной части Балтийского моря. В то же время отмечаемое снижение только частично обусловлено влиянием природных факторов (Сташко, 2021). До 2016 г. содержание растворенного кислорода в восточном районе летом было выше 7 мгО/дм³ (Александров, 2014, 2018; Александров и др., 2017) (рисунок 2а). После запуска очистных сооружений близкие к пороговому для рыбохозяйственных водоемов уровню (ПДК 6.0 мгО/дм³) концентрации наблюдали в июле 2021 г. Насыщение вод ниже 90 % в 2020–2022 гг. также фиксировали только в восточном районе. Уменьшение концентрации растворенного кислорода ниже порогового уровня, наблюдаемое в последние годы в восточном районе у устья р. Преголи, может свидетельствовать о росте антропогенной нагрузки на этот район после начала поступления даже очищенных сточных вод Калининграда.

Признаком роста антропогенного воздействия также может быть увеличение в июле (в среднем 5.9 мг/дм³) и ноябре (4.2 мг/дм³) величин БПК₅ в 2020–2022 гг., по сравнению с многолетним периодом 2007–2016 гг. (5.6 мг/дм³ и 3.5 мг/дм³) (рисунок 2б). Более выраженный рост отмечен для апреля – до 6.8 с 5.8 мг/дм³. Кроме того, величина БПК₅ в апреле в восточном районе в 2020–2022 гг. является максимальной

среди других районов, в отличие от периода до 2016 г., когда пик приходился на Приморскую бухту. Большую часть вегетационного периода в 2020–2022 гг. величины БПК₅ в восточном и других районах превышали пороговый для рыбохозяйственных водоемов уровень (2.1 мг/дм³) в 2–3 раза, что соответствует высокому уровню обилия и продуктивности фитопланктона в Вислинском заливе (Александров, 2022; Aleksandrov, 2010).

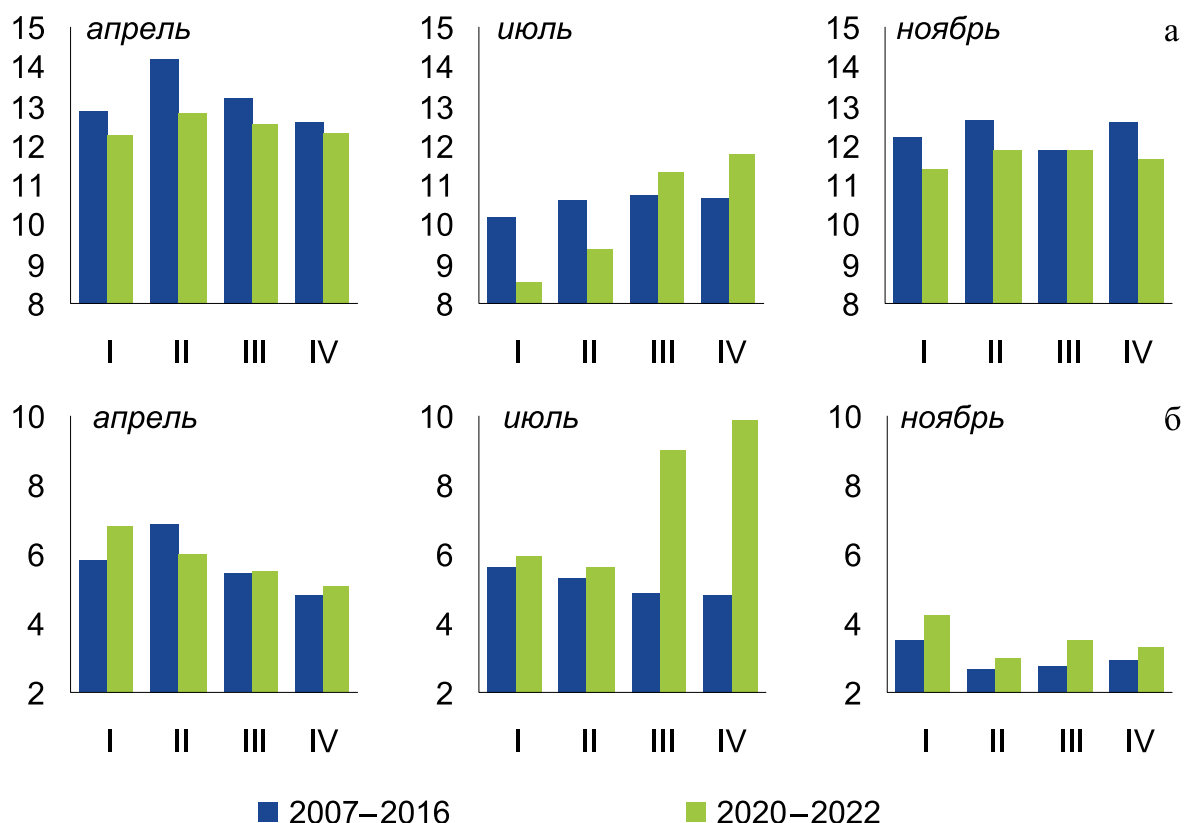


Рис. 2 – Растворенный кислород, мгО/дм³ (а) и БПК₅, мг/дм³ (б) в 2007–2016 гг. и 2020–2022 гг. в Вислинском заливе (районы: I – восточный, II – Приморская бухта, III – прибалтийский, IV – центральный)

По многолетним данным с 2007 по 2016 гг., средние уровни фосфора фосфатов были повышены в восточном районе и Приморской бухте (Александров и др., 2017; Александров, 2018), что также наблюдалось в 2020–2022 гг., особенно в весенний (апрель) и осенний (ноябрь) периоды (рисунок 3). Концентрации фосфора фосфатов в восточном районе демонстрируют сложную многолетнюю динамику и характеризуются в 2020–2022 гг. ростом значений по сравнению с 2007–2016 гг. в отдельные периоды (рисунок 3). В частности, весной в апреле концентрация фосфора фосфатов увеличилась с 9 до 21 мкгР/дм³, что может быть связано с возросшей биогенной нагрузкой, а также летом в июле с 22 до 156 мкгР/дм³ как следствие «гиперцветения» водорослей в 2021 г.

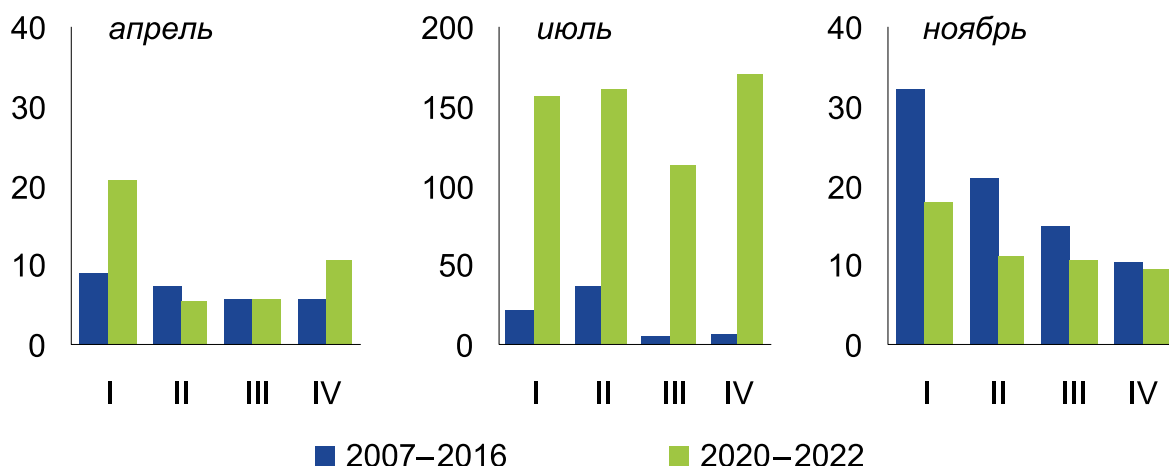


Рис. 3 – Концентрация фосфора фосфатов, мкгР/дм³, в 2007–2016 гг. и 2020–2022 гг. в Вислинском заливе (районы: I – восточный, II – Приморская бухта, III – прибалтийский, IV – центральный)

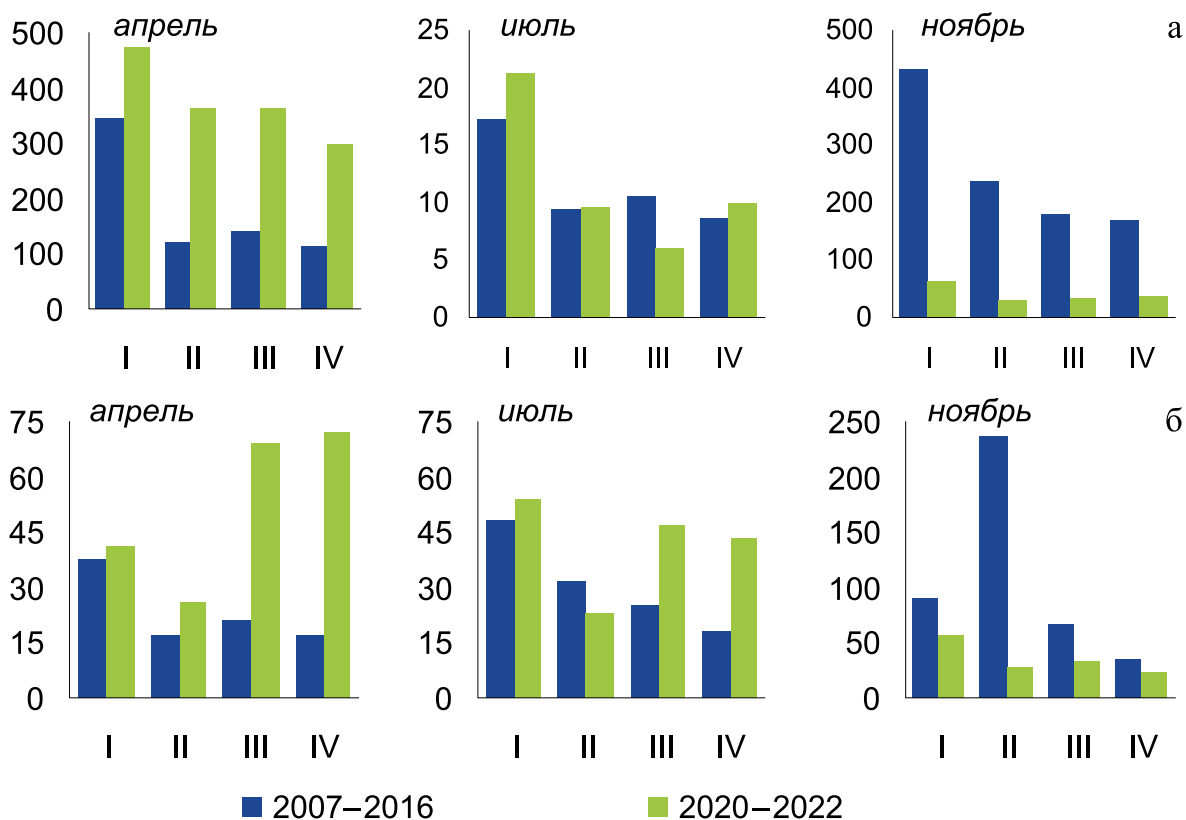


Рис. 4 – Азот нитратов, мкгN/дм³ (а) и аммонийный азот, мкгN/дм³ (б) в 2007–2016 гг. и 2020–2022 гг. в Вислинском заливе (районы: I – восточный, II – Приморская бухта, III – прибалтийский, IV – центральный)

Наблюдаемое в 2020–2022 гг. пространственное распределение концентраций азота нитратов характеризовалось повышенным содержанием в восточном районе, что соответствовало многолетним данным (Александров и др., 2017; Александров, 2018). В сравнении с периодом до 2016 г., в апреле и июле 2020–2022 гг. концентрации азота нитратов в восточном районе были более высокими (рисунок 4а). Поздней осенью в ноябре отмечены значительно более низкие концентрации азота нитратов (66 мкгN/дм^3 в 2020–2022 гг. и 433 мкгN/дм^3 в 2007–2016 гг.), что могло быть связано с более продолжительным вегетационным периодом в условиях теплой погоды, после чего в декабре 2021 г. содержание значительно увеличилось (302 мкгN/дм^3).

Содержание аммонийного азота в 2020–2022 гг. в восточном районе мало изменилось по сравнению с предыдущим периодом. Можно отметить только заметное снижение величин в осенний период (рисунок 4б).

Примером увеличенной антропогенной нагрузки на восточный район, которая наблюдается в последние годы, служит июнь 2022 г. В условиях минимального объема речного стока в восточном районе отмечено локальное загрязнение азотом нитратов акватории, расположенной рядом с местом выпуска сточных вод (станция № 1) – 421 мкгN/дм^3 , а западнее (станция № 2) в пределах района снижалось до 27 мкгN/дм^3 , тогда как в других районах не превышало 4 мкгN/дм^3 (таблица 1). В 2007–2016 гг. столь сильного загрязнения азотом нитратов в восточном районе не наблюдали. Вероятно, это результат работы очистных сооружений, введенных в 2016 г. Несмотря на максимальную величину для акватории залива, концентрация азота нитратов на станции № 1 была более, чем в 20 раз, ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов (9000 мкгN/дм^3), однако содержание азота нитритов 37 мкгN/дм^3 (промежуточной формы окисления аммоний-иона до нитрат-иона) почти двукратно превышало ПДК (20 мкгN/дм^3). Вместе с тем концентрация аммонийного азота была близка к средней на всей акватории (27 и 17 мкгN/дм^3). Описанный случай загрязнения качественно отличается от наблюдаемых до 2016 г., преимущественно локализованных в Приморской бухте, когда ключевым свидетельством загрязнения был рост значений аммонийного азота вплоть до уровней выше ПДК (Александров и др., 2017; Александров, 2018).

В целом, в современный период в восточном районе наблюдается увеличение загрязнения вод по отдельным показателям относительно многолетнего периода до запуска очистных сооружений Калининграда в 2016 г. Рост значений БПК₅, увеличение концентраций минеральных форм биогенных элементов весной могут свидетельствовать о росте нагрузки с водосбора в условиях развития хозяйственной деятельности. Сложная динамика показателей в летний сезон, когда объем речного стока снижен, в частности, уменьшение содержания растворенного кислорода, также могут указывать на изменение антропогенной нагрузки или отражать связь с внутренними процессами в экосистеме, в том числе под влиянием климатических изменений.

Приморская бухта

Приморская бухта – также мелководный район. По южной границе, отделяющей его от остальной акватории, проходит Калининградский морской канал. Канал служит судоходным маршрутом, постоянно углубляется до 9–12 м и имеет единственный открытый участок в месте пересечения бухты (Chubarenko, Margonski, 2008). До 2016 г. в Приморскую бухту через Калининградский отводной канал поступали загрязненные воды низкой степени очистки, следствием чего было периодически наблюдаемое загрязнение вод (Александров, 2014, 2018; Александров и др., 2017; Богданов и др., 2019).

Особенностью многолетнего кислородного режима в Приморской бухте (2007–2016 гг.) был наибольший уровень концентрации и степени насыщения в течение большей части вегетационного периода, что могло быть связано с повышенной интенсивностью развития фитопланктона в данном районе в условиях поступления дополнительных количеств биогенных элементов через отводной канал (Александров, 2014; 2018). В 2020–2022 гг. содержание растворенного кислорода было ниже, особенно в летний период. В частности, в июле 2021 г. оно было промежуточным между зоной дефицита (восточный район) и остальными районами, когда изменчивость достигала нескольких единиц мгО/дм³ или десятков процентов насыщения (июль 2021 г.). Величины БПК₅ в 2020–2022 гг. были близки к наблюдаемым ранее (5.6 при 5.3 мг/дм³ в июле и 3.0 при 2.7 мг/дм³ в ноябре), а в апреле снизились (с 6.9 до 6.0 мг/дм³), в отличие от восточного района (рисунок 2).

Динамика содержания фосфора фосфатов в Приморской бухте в предыдущий период характеризовалась периодически наблюдаемым (1–2 раза в год) локальным загрязнением, которое было до нескольких десятков раз выше, чем на остальной акватории, превышающая ПДК для гипертрофных водоемов (200 мкгР/дм³): в сентябре 2008 г., августе 2009 г., мае 2011 г., июле и августе 2014 г. (Александров и др., 2017; Александров, 2018). В 2020–2022 гг. концентрации фосфора фосфатов в Приморской бухте были близки к средним по акватории и ожидаемо ниже по сравнению с предыдущим периодом, в частности в ноябре почти в 2 раза. Вместе с тем в отдельные периоды, например, в условиях аномального «цветения» водорослей в июле 2021 г., на всей акватории залива концентрации могли значительно возрасти (рисунок 3). Межгодовая динамика содержания фосфора фосфатов в Приморской бухте может свидетельствовать об улучшении качества вод в период 2020–2022 гг. после запуска новых очистных сооружений и переноса места выпуска очищенных вод в восточный район. В то же время длительное поступление больших объемов биогенных элементов с речным и хозяйственно-бытовым стоком и продукционные процессы в эвтрофном Вислинском заливе (Александров, Горбунова, 2010; Александров, 2022; Aleksandrov, 2010) способствовали накоплению фосфора в водоеме, в частности, в донных отложениях (Kruk et al., 2016), что ежегодно приводит к наблюдаемым процессам регенерации фосфатов и высоким концентрациям фосфора в летний период, что в свою очередь способствует развитию синезеленых водорослей до уровня «цветения»

при благоприятных климатических условиях. Ярким эпизодом, иллюстрирующим данные процессы, являлось «гиперцветение» вод в июле 2021 г., сопровождавшееся рекордным для 15-летнего периода ростом концентраций фосфора фосфатов во всей акватории Вислинского залива. Как следствие, введение очистных сооружений не может оказать быстрый эффект на снижение уровня эвтрофирования Вислинского залива (Александров, Сташко, 2021).

По данным 2007–2016 гг. и 2020–2022 гг., содержание азота нитратов в Приморской бухте было значительно ниже, чем в восточном районе и сопоставимо с прибалтийским и центральным районами, где сказывается разбавляющее влияние морских вод. В многолетней динамике наблюдается разнонаправленная изменчивость в разные сезоны года. В частности, в апреле 2020–2022 гг. концентрации были в 3 раза выше (120 мкгN/дм^3 в 2007–2016 гг. и 362 мкгN/дм^3 в 2020–2022 гг.), а в ноябре многократно ниже (235 и 18 мкгN/дм^3), но такие изменения были характерны в целом для всей российской акватории (рисунок 4а). Влияние на это оказывали климатические условия, определяющие более позднее прохождение весеннего половодья или позднее окончание вегетационного периода при высоком осеннем прогреве вод.

В 2007–2016 гг. в Приморской бухте неоднократно наблюдали повышенное содержание аммонийного азота из-за поступления слабо очищенных сточных вод; в частности, в ноябре 2012 г. концентрация достигала 723 мкгN/дм^3 , что значительно выше ПДК для рыбохозяйственных водоемов (400 мкгN/дм^3) (Александров и др., 2017). В последние годы локального загрязнения не отмечалось, и среднемноголетнее содержание было значительно более низким, особенно осенью (рисунок 4б). Такие показатели могут свидетельствовать об отсутствии выраженного антропогенного воздействия на Приморскую бухту после улучшения степени очистки сточных вод и переноса их выпуска в восточный район.

Прибалтийский и центральный районы

Прибалтийский район расположен напротив морского пролива, ввиду чего он находится под сильным воздействием затоков морских вод. Южнее него находится центральный район, который имеет трансграничное расположение, относясь как к российской, так и к польской акваториям (рисунок 1). Гидрологические и гидрохимические условия в центральном районе во многом определены совокупным влиянием морских вод из прибалтийского района и пресноводного стока из Эльблонгского района в польской части. При устойчивых ветрах западного и северного направлений заток может приводить к росту солёности в прибалтийском и центральном районах залива до 6–8 ‰ (Журавлева, Тшосиньска, 1971; Александров и др., 2017).

Динамика растворенного кислорода в прибалтийском и центральном районах в 2020–2022 гг., в целом, соответствовала средним показателям по акватории, обычно превышая 100 % насыщения, а при «гиперцветении» залива в июле 2021 г.

достигая 156 и 144 % насыщения (таблица 1). БПК₅ и концентрации фосфора фосфатов в 2007–2016 и 2020–2022 гг. характеризовались пониженными величинами по сравнению с восточным районом и Приморской бухтой, как следствие поступления низкопродуктивных морских вод через пролив (Александров, 2014, 2018; Александров и др., 2017). Вместе с тем, в отдельные периоды они могут значительно возрасти, что наблюдалось в условиях «гиперцветения» синезеленых водорослей в июле 2021 г., пространственное распределение которых характеризовалось максимумом в прибалтийском и центральном районах (рисунок 2б, 3). Динамика концентраций минерального фосфора и БПК₅ связана с интенсивностью развития фитопланктона, минерализацией органического вещества и поступлением фосфатов из донных отложений вследствие прогрева вод залива, в результате чего весной и летом в заливе попеременно могут наблюдаться несколько пиков и минимумов концентраций.

Азот нитратов в прибалтийском и центральном районах, согласно многолетним данным, обычно характеризуется более низкими концентрациями среди остальных районов в течение большей части вегетационного периода из-за удаленности от основного источника поступления биогенных элементов с водосбора (р. Преголи), а также разбавляющего влияния морских вод. В сравнении с периодом до 2016 г., в апреле 2020–2022 гг. концентрации азота нитратов, как и на всей российской акватории, были более высокими (рисунок 4а). Поздней осенью в ноябре, напротив, в прибалтийском и центральном районах отмечено значительно более низкое содержание азота нитратов (32 и 37 мкгN/дм³) в 2020–2022 гг., по сравнению с 2007–2016 гг. (180 и 169 мкгN/дм³), что могло быть связано с более продолжительным вегетационным периодом в условиях теплой погоды.

По многолетним данным, концентрации аммонийного азота в этих районах в период до 2016 г., как правило, были одними из наиболее низких среди других районов, в том числе из-за удаленности от крупных антропогенных источников загрязнения (Калининградская агломерация) и разбавляющего влияния морских вод. Значительное отличие от среднеевропейского уровня наблюдалось только в апреле 2020 г., когда в прибалтийском и центральном районах концентрации (162 и 180 мкгN/дм³) были в 5–10 раз выше, чем отмечалось в другие годы. Также они были выше, чем в восточном районе и Приморской бухте в 2–5 раз, где в апреле 2020 г. наблюдались величины близкие к среднеевропейскому уровню (таблица 1). Столь высокий уровень можно характеризовать как загрязнение, источник которого неизвестен и, возможно, связан с поступлением из польской части залива. Также повышенные концентрации аммонийного азота отмечены в июле 2021 г. (82 мкгN/дм³) в прибалтийском районе и особенно в августе 2021 г. (172 мкгN/дм³) в центральном районе, что явилось следствием природной причины – кратковременного «гиперцветения» в июле 2021 г. и последующего разложения синезеленых водорослей. В осенний период в 2020–2022 гг. содержание аммонийного азота было более низким, чем в 2007–2016 гг. (рисунок 4б).

Эльблонгский район

Эльблонгский район расположен в южной части Вислинского залива (рисунок 1), характеризуется небольшими глубинами и влиянием речного стока р. Ногат, а также удаленностью от морского пролива, следствием чего является низкий уровень солености вод (Журавлева, Тшосиньска, 1971). Данный район полностью относится к польской акватории, вследствие чего для него отсутствуют сравнимые данные по гидрохимическим показателям относительно других районов Вислинского залива. Согласно данным исследований польских ученых, с 2010 г. в этом районе наблюдается снижение содержания общего азота, фосфора и кремния (значимым является тренд только для общего фосфора). Также для периода с 2010 г. приведены данные о росте средних значений солености (Kownacka et al., 2020).

В 2022 г. в Эльблонгском районе Республикой Польша был построен судоходный канал через Вислинскую косу, оснащенный шлюзом. Эксплуатация крупного инженерного сооружения, пусть и не являющегося постоянным проливом, способно оказать значимое воздействие на состояние окружающей среды на значительной акватории Вислинского залива (Rozynski, Bielecka, 2022). Работы по постоянному углублению и поддержанию судоходной глубины вдоль фарватера, проходящего через мелководный Эльблонгский район, могут повлиять на состояние донных осадков в польской части и способствовать поступлению биогенных элементов из илистых донных осадков в воду и дальнейшей эвтрофикации Вислинского залива.

Заключение

Вислинский залив – одна из крупнейших лагун Европы, гидрологические и гидрохимические условия в которой характеризуются значительной пространственной изменчивостью. В условиях меняющегося антропогенного воздействия (ввод очистных сооружений и др.) и климатических колебаний в гидрохимическом режиме мелководной лагуны могут происходить значительные изменения, которые будут отличаться в разных районах Вислинского залива, что обусловлено гидрологическими условиями (поступление морских вод, речной сток).

Воздействие антропогенных факторов на динамику гидрохимических условий в наибольшей степени оказало влияние на восточный район и Приморскую бухту. В восточном районе в 2020–2022 гг. наблюдался рост загрязнения в сравнении с периодом 2007–2016 гг., что проявлялось в увеличении значений БПК₅, снижении содержания растворенного кислорода (вплоть до значений ниже ПДК на отдельных станциях летом 2021 г.). Сезонная динамика фосфора фосфатов и азота нитратов характеризовалась более высокими величинами весной в период весеннего половодья, когда в залив поступает значительная доля годового объема биогенных элементов, что может свидетельствовать о росте нагрузки с водосбора в условиях развития хозяйственной деятельности. Кроме того, в восточном районе летом в период минимального речного

стока наблюдали локальное загрязнение азотом нитратов и нитритов, что подтверждает увеличение антропогенной нагрузки на этот район после ввода новых очистных сооружений Калининграда из-за переноса их выпуска в восточный район.

Значимым изменением гидрохимических условий в 2020–2022 гг., по сравнению с периодом 2007–2016 гг., стало смещение максимума загрязнения из Приморской бухты в восточный район по ряду исследуемых показателей. В частности, такое смещение наблюдали для БПК₅. Концентрации фосфора фосфатов и аммонийного азота, которые вследствие локального загрязнения сточными водами до 2016 г. в отдельные месяцы (превышая ПДК для рыбохозяйственных водоемов) были многократно выше, чем в других районах, в 2020–2022 гг. были на уровне или ниже, чем в среднем по акватории. Схожая динамика фиксировалась для азота нитратов. Такое снижение может свидетельствовать об отсутствии выраженного антропогенного воздействия на Приморскую бухту, после улучшения степени очистки сточных вод и переноса их выпуска в восточный район.

Прибалтийский и центральный районы находятся под сильным воздействием природных условий (затоков морских вод). В 2020–2022 гг., как и в предыдущий период, БПК₅, концентрации фосфора фосфатов, азота нитратов и аммонийного азота обычно характеризовались более низкими концентрациями из-за удаленности от основных источников поступления биогенных элементов с водосбора (р. Преголи), антропогенного загрязнения (г. Калининград) и благодаря разбавляющему влиянию морских вод. Сезонные изменения в этих районах в целом соответствовали общим закономерностям для всего Вислинского залива. В частности, наблюдался рост величин фосфора фосфатов и аммонийного азота весной и летом, азота нитратов весной и БПК₅ летом. Одновременно, как и в остальных частях акватории, отмечено низкое содержание минеральных форм биогенных элементов (фосфор фосфатов, аммонийный азот, азот нитратов) в условиях позднего окончания вегетационного периода при повышенном осеннем прогреве вод в 2020–2021 гг.

Сравнивая современные величины исследуемых гидрохимических параметров с уровнями, которые фиксировали в Вислинском заливе до 2016 г., можно отметить снижения концентрации растворенного кислорода и рост БПК₅ во все сезоны. Без учета периода «гиперцветения» вод в июле 2021 г., среднее по акватории содержание фосфора фосфатов и аммонийного азота было близко к среднемуголетнему, а азота нитратов – незначительно увеличилось, в основном за счет поступлений весной с водосбора. Ввод очистных сооружений Калининграда снизил интенсивность локального загрязнения в Приморской бухте, одновременно увеличив антропогенную нагрузку на восточный район. В целом, концентрации биогенных элементов сохранялись на среднемноголетнем уровне, обеспечивая высокий уровень эвтрофирования Вислинского залива и возможность «гиперцветения» синезеленых водорослей, что наблюдалось в июле 2021 г.

Благодарности. Гидрохимические исследования выполнены в рамках госзадания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00004-23-00, анализ пространственного распределения в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

Список литературы

1. *Александров С. В.* Гидрохимический режим и эвтрофирование Вислинского залива Балтийского моря // Промыслово-биологические исследования АтлантНИРО в 2010–2013 годах. Т. 1: Балтийское море и заливы. Калининград: Изд-во АтлантНИРО, 2014. С. 85–100.
2. *Александров С. В.* Пространственные изменения гидрохимических показателей в Вислинском заливе в 2014–2016 годах // Труды АтлантНИРО. 2018. Т. 2. № 1 (5). С. 5–21.
3. *Александров С. В.* Динамика биопродуктивности экосистем лагун Балтийского моря под влиянием изменений климата, эвтрофикации и «цветений» цианобактерий // Динамика экосистем в голоцене: Сборник статей по материалам всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 17–21 сентября 2022 г. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. С. 20–25.
4. *Александров С. В., Вахрушева С. А., Мальфанов И. Л., Тренина Н. Е.* Пространственные изменения гидрохимических показателей и солености воды в Вислинском заливе в 2010–2013 годах // Труды АтлантНИРО. 2017. Т. 1. № 3. С. 33–64.
5. *Александров С. В., Горбунова Ю. А.* Биогенная нагрузка на Вислинский залив со стоком реки Преголя // Вода: химия и экология. 2010. № 1 (19). С. 4–8.
6. *Александров С. В., Сташко А. В.* Пространственное распределение и сезонная динамика биогенных элементов в Вислинском заливе в 2019 году // Известия КГТУ. 2021. № 60. С. 11–21. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2021-60-11-21>.
7. *Богданов Н. А., Басс О. В., Воронцов А. А.* Гидро- и литодинамический контроль химического загрязнения внутренних водоемов: Калининградский залив // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 1 (49). С. 14–39.
8. *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.
9. *Журавлева Л. А., Тиосиньска А.* Гидрохимический режим // Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. С. 219–262.
10. *Сапожников В. В.* Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. Москва: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
11. *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.
12. *Силич М. В.* Водный баланс залива // Гидрометеорологический режим Вислинского залива. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. С. 143–164.
13. *Сташко А. В.* Современные кислородные условия в крупной мелководной лагуне юго-восточной Балтики (Вислинский залив) // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 3. С. 42–49. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-3-42-49>.
14. *Стонт Ж. И., Буканова Т. В., Крек Е. В.* Изменчивость климатических характеристик прибрежной части Юго-Восточной Балтики в начале XXI века // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2020. № 1. С. 81–94.
15. *Aleksandrov S. V.* Biological production and eutrophication of Baltic Sea estuarine ecosystems: The Curonian and Vistula Lagoons // Marine Pollution Bulletin. 2010. Vol. 61. No. 4–6. P. 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.02.015>.

16. Chubarenko B., Margoński P. The Vistula Lagoon. In: Schiewer, U. (eds) Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. Vol. 197. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_8.
17. Kownacka J., Calkiewicz 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 // *Oceanology*. 2020. Vol. 62. No. 4. P. 538–555. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.08.004>.
18. 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. No. 4. P. 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.05.004>.
19. Rozynski G., Bielecka M. Sediment quality in the Polish part of the trans-boundary Vistula Lagoon: implications for deposition management // *Marine Policy*. 2022. Vol. 146. P. 105288. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105288>.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023, одобрена к печати 13.02.2023.

Для цитирования: 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. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4).

SPATIAL DISTRIBUTION AND SEASONAL DYNAMICS OF HYDROCHEMICAL CONDITIONS IN THE VISTULA LAGOON OF THE BALTIC SEA IN 2020–2022

A. V. Stashko¹, S. V. Aleksandrov^{1,2}

¹*Atlantic branch of FSBSI “VNIRO” (“AtlantNIRO”),
5, Dm. Donskogo, Kaliningrad, 236022, Russia,
e-mail: hydrobio@mail.ru;*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: hydrobio@mail.ru*

To study current hydrochemical conditions in the Vistula Lagoon and the trend of their change under changing anthropogenic impact in 2020–2022 seasonal variability and spatial distribution of hydrochemical parameters (salinity, pH, dissolved oxygen, BOD₅, mineral forms of phosphorus and nitrogen) were investigated. The water body is exposed to intense anthropogenic impact from the Kaliningrad agglomeration, the nature of which has undergone qualitative changes in recent years, therefore, a comparative analysis was carried out with the period 2007–2016, which preceded the launch of modern treatment facilities in Kaliningrad. The Vistula Lagoon is characterized by spatial variability of hydrological and hydrochemical conditions, which was considered for 4 different types of regions (eastern, near-Baltic, central and Primorskaya Bay). The impact of anthropogenic factors on the dynamics of hydrochemical conditions had the greatest impact on the eastern region and Primorskaya Bay. The eastern region of the lagoon accounts for the main inflow of nutrients from the catchment area (from the Pregola River), and since 2016 the wastewater outlet from Kaliningrad is located here. Compared to the period before 2016, in the eastern area a significant increase of BOD₅, a decrease of dissolved oxygen concentrations, a multiple excess of nitrite and nitrate nitrogen in comparison with the all of the water area lagoon were recorded. In the Primorskaya Bay, where until 2016 low-

purity wastewater was supplied from the city of Kaliningrad, in 2020–2022 pollution for most of the studied indicators (BOD₅, phosphate phosphorus, ammonium nitrogen) decreased and corresponded to the average values for the water area. The near-Baltic and central regions are strongly affected by natural conditions (sea water inflows), where in 2020–2022, as in the previous period, lower concentrations of nutrients were observed due to the remoteness from the main sources of pollution. Despite the decrease in the intensity of local pollution in the Primorskaya Bay in 2020–2022, the concentrations of mineral forms of nutrients remained at high levels, providing intensive development of algae (including the growth of BOD₅) and eutrophication of the Vistula Lagoon.

Keywords: pollution, nutrients, oxygen regime, salinity, treatment facilities, Vistula Lagoon

Acknowledgments. Hydrochemical studies were carried out within the framework of the state assignment of the VNIRO (No. 076-00004-23-00), analysis of the spatial distribution within a support of the state assignment of the IO RAS (Theme No. FMWE-2021-0012).

References

1. Aleksandrov, S. V., 2014: Gidrohimicheskij rezhim i evtrofirovaniye Vislinskogo zaliva Baltijskogo morya (Hydrochemical regime and eutrophication of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea). *Promyslovo-biologicheskie issledovaniya AtlantNIRO v 2010–2013 godakh*. Vol. 1: *Baltijskoe more i zalivy*. Kaliningrad, AtlantNIRO Publ., 85–100.
2. Aleksandrov, S. V., 2018: Prostranstvennyye izmeneniya gidrokhimicheskikh pokazateley v Vislinskom zalive v 2014–2016 godakh (Spatial changes in hydrochemical parameters in the Vistula Lagoon in 2014–2016). *Trudy AtlantNIRO*, **2** (1), 5–21.
3. Aleksandrov, S. V., 2022: Dinamika bioproduktivnosti ekosistem lagun Baltijskogo morya pod vliyaniem izmenenij klimata, evtrofikacii i “cvetenij” cianobakterij (Dynamics of bioproductivity of ecosystems of the Baltic Sea lagoons under the influence of climate change, eutrophication and cyanobacteria “blooms”). *The collection of Proceedings of the All-Russian Scientific Conference (St. Petersburg, September 17–21, 2022)*. St. Petersburg, HSPUR Publ., 20–25.
4. Aleksandrov, S. V., S. A. Vakhrusheva, I. L. Malfanov, and N. E. Trenina, 2017: Prostranstvennyye izmeneniya gidrokhimicheskikh pokazateley i solenosti vody v Vislinskom zalive v 2010–2013 godakh (Spatial changes in hydrochemical parameters and water salinity in the Vistula Lagoon in 2010–2013). *Trudy AtlantNIRO*, **1** (3), 33–64.
5. Aleksandrov, S. V. and Y. A. Gorbunova, 2010: Biogennaya nagruzka na Vislinskiy zaliv so stokom reki Pregolya (Nutrient load on the Vistula Lagoon with the Pregolya river runoff). *Voda: khimiya i ekologiya*, 2010, **1** (19), 4–8.
6. Aleksandrov, S. V. and A. V. Stashko, 2021: Prostranstvennoye raspredelenie i sezonnaya dinamika biogennykh elementov v Vislinskom zalive v 2019 godu (Spatial distribution and seasonal dynamics of nutrients in the Vistula lagoon in 2019). *Izvestiya KGTU*, **60**, 11–21. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2021-60-11-21>.
7. Aleksandrov, S. V., 2010: Biological production and eutrophication of Baltic Sea estuarine ecosystems: The Curonian and Vistula Lagoons. *Marine Pollution Bulletin*, **61** (4–6), 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.02.015>.

8. Bogdanov, N. A., O. V. Bass, and A. A. Vorontsov, 2019: Gidro- i litodinamicheskij kontrol' himicheskogo zagryazneniya vnutrennih vodoemov: Kaliningradskij zaliv (Hydro- and lithodynamic control of chemical pollution of inland water objects: Kaliningrad Lagoon). *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, **1** (49), 14–39.
9. Chubarenko B. and P. Margoński, 2008: *The Vistula Lagoon*. In: Schiewer, U. (eds) *Ecology of Baltic Coastal Waters. Ecological Studies*, Springer, Berlin, Heidelberg, **197**, https://doi.org/10.1007/978-3-540-73524-3_8.
10. Gorbunova, Y. A., B. V. Chubarenko, and D. A. Domnin, 2017: Biogennaya nagruzka na vodosbornyj bassejn reki Pregoli ot antropogennyh istochnikov (Nutrient load on the catchment area of the Pregoli River from anthropogenic sources). *Izvestiya KGTU*, 2017, **47**, 34–45.
11. Kownacka, J., J. Całkiewicz, and R. Kornijów, 2020: A turning point in the development of phytoplankton in the Vistula Lagoon (southern Baltic Sea) at the beginning of the 21st century. *Oceanology*, **62** (4), 538–555. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.08.004>.
12. Kruk, M., B. Jaworska., I. Jablonska-Barna, and A. Rychter, 2016: How do differences in the nutritional and hydrological background influence phytoplankton in the Vistula Lagoon during a hot summer day? *Oceanology*, **58** (4), 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.05.004>.
13. Rozynski, G. and M. Bielecka, 2022: Sediment quality in the Polish part of the trans-boundary Vistula Lagoon: implications for deposition management. *Marine Policy*, **146**, 105288. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105288>.
14. Sapozhnikov, V. V., 2003: *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhozyaystvennykh vodoyomov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana (Guidelines for the chemical analysis of marine and freshwater in the environmental monitoring of fishery bodies of water and areas of the World Ocean promising for fishing)*. Moscow, 2003, 202 p.
15. Senin, Y. M., V. A. Smyslov, and M. M. Khlopnikov, 2004: Obshchaya charakteristika Vislinskogo zaliva. *Zakonomernosti gidrobiologicheskogo rezhima vodoemov raznogo tipa*. Moscow, Nauchnyj mir, 17–18.
16. Silich, M. V., 1971: Vodnyj balans zaliva. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 143–164.
17. Stashko, A. V., 2021: Sovremennye kislorodnye usloviya v krupnoj melkovodnoj lagune yugovostochnoj Baltiki (Vislinskij zaliv) (Large southeast Baltic shallow lagoon modern oxygen conditions (Vistula Lagoon). *Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, **3**, 42–49. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-3-42-49>.
18. Stont, Z. I., T. V. Bukanova, and E. V. Krek, 2020: Izmenchivost' klimaticeskikh harakteristik pribrezhnoj chasti Yugo-Vostochnoj Baltiki v nachale XXI veka (Variability of climatic characteristics of the coastal part of the South-East Baltic at the beginning of the 21st century). *Vestnik Baltijskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta*. Seriya: Estestvennye i medicinskie nauki, **1**, 81–94.
19. Zhuravleva, L. A. and A. Tshosinska, 1971: Gidrohimicheskij rezhim. *Gidrometeorologicheskij rezhim Vislinskogo zaliva*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 219–262.

Submitted 10.01.2023, accepted 13.02.2023.

For citation: Stashko, A. V. and S. V. Aleksandrov, 2023: Spatial distribution and seasonal dynamics of hydrochemical conditions in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea in 2020–2022. *Journal of Oceanological Research*, **51** (1), 71–90, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(1\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).4).