

Водные биоресурсы и среда обитания

2023, том 6, номер 1, с. 48–61

<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru

doi: 10.47921/2619-1024_2023_6_1_48

ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment

2023, vol. 6, no. 1, pp. 48–61

<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru

doi: 10.47921/2619-1024_2023_6_1_48

ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

УДК 551.468.3

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В КУРШСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2018–2022 ГОДАХ

© 2023 А. В. Сташко¹, С. В. Александров^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»),
Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), Калининград 236022, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Шишова Российской академии наук (ИО РАН), Москва 117997, Россия
E-mail: hidanstashko@gmail.com

Аннотация. Куршский залив Балтийского моря представляет собой лагуну и относится к водоемам рыбохозяйственного значения высшей категории. Его современное состояние характеризуется рядом проблем: поступлением биогенных элементов с большого водосбора, «цветением» вод. В рамках мониторинга среды обитания водных биологических ресурсов, проводимого на российской акватории Куршского залива в 2018–2022 гг., изучено пространственное распределение гидрохимических показателей в 6 районах, выделенных с учетом морфометрических и гидрологических особенностей: заливе Теплом, западном, центральном, восточном, южном и неманском районах. Гидрохимические условия в зал. Теплом характеризовались значительным отклонением концентраций растворенного кислорода от остальной российской части, более высокими значениями БПК₅ и аммонийного азота, пониженными величинами рН и азота нитратов. В западном районе отмечались низкие величины растворенного кислорода, БПК₅, аммонийного и нитратного азота. В южном районе наблюдали сниженное содержание аммонийного азота и азота нитратов. В центральном районе гидрохимические показатели были близки к средним по российской акватории. Восточный и неманский районы, подверженные значительному влиянию стока р. Неман, характеризуются высокой концентрацией азота нитратов в период половодья; также отмечаются повышенные величины аммонийного азота и БПК₅ летом при «цветении» вод.

Ключевые слова: Куршский залив, эвтрофирование, кислородный режим, биохимическое потребление кислорода, биогенные элементы, «цветение» воды

SPECIFIC FEATURES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF HYDROCHEMICAL PARAMETERS IN THE CURONIAN LAGOON OF THE BALTIC SEA IN 2018–2022

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

¹Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI “VNIRO”),
Atlantic Branch of the FSBSI “VNIRO” (“AtlantNIRO”), Kaliningrad 236022, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (IO RAS), Moscow 117997, Russia
E-mail: hidanstashko@gmail.com

Abstract. Curonian Bay of the Baltic Sea is a lagoon that is considered to be a water body of the highest fisheries importance. Its current geoenvironmental status is characterized by a number of problems: influx of biogenic substances from a large catchment area, algal bloom, etc. As part of the monitoring surveys of the habitat of aquatic living resources that were conducted in Russian waters of Curonian Lagoon in 2018–2022, the spatial distribution of hydrochemical parameters was investigated in 6 areas established on the basis of their morphometric and hydrological features: Teply (Warm) Bay, western, central, eastern, and southern areas, and the Neman River discharge zone. Hydrochemical conditions in Teply Bay were characterized by a considerable deviation of dissolved oxygen concentrations from the rest of Russian waters of Curonian Lagoon, as well as by the higher values of BOD₅ and ammonia nitrogen, and lower values of pH and nitrate nitrogen. In the western area, the lowest content of dissolved oxygen, BOD₅, ammonia, and nitrate nitrogen was recorded. In the southern area, there was a reduced content of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen. In the central area, the values of hydrochemical parameters were close to the average ones for Russian waters. The eastern and Neman River discharge areas, exposed to significant influence of the Neman River runoff, were characterized by a high concentration of nitrate nitrogen during seasonal flood, as well as by increased values of ammonia nitrogen and BOD₅ during algal bloom in summer.

Keywords: Curonian Lagoon, eutrophication, oxygen conditions, biochemical oxygen demand, nutrients, algal bloom

ВВЕДЕНИЕ

Куршский залив — крупнейшая мелководная лагуна Европы площадью 1584 км², расположенная в юго-восточной части Балтийского моря и соединенная с ним узким проливом. Средняя глубина залива составляет 3,8 м. От моря залив отделен Куршской косой — узким песчаным барьером длиной 98 км. Залив относится к трансграничным водоемам; 75 % его акватории принадлежит Российской Федерации, а северная часть — Литве.

Следствием многократного преобладания годового объема речного стока над затоком морских вод является то, что южная и центральная части акватории пресноводны, а небольшая соленость (1–2 ‰) наблюдается ближе к Клайпедскому проливу в северной части. Водосборная территория Куршского залива расположена в густонаселенных районах с развитыми сельским хозяйством и промышленностью. Основной сток (98 % из 20,8 км³/год) в Куршский залив поступает с р. Неман — одной из крупнейших рек Балтийского моря, несущей биогенные элементы со значи-

тельной территории Литвы и Беларуси. Вместе с речным стоком ежегодно поступают большие объемы биогенных элементов, значительная часть которых удерживается в заливе [1]. Следствием внешней биогенной нагрузки, а также внутриводоемных процессов, связанных с накоплением органических соединений, является сильное эвтрофирование вод залива. По уровню первичной продуктивности Куршский залив соответствует гипертрофному статусу и относится к наиболее эвтрофным водоемам Европы [2]. «Цветение» воды из-за массового развития синезеленых водорослей негативно влияет на жизнедеятельность рыб и других гидробионтов, особенно в прибрежной зоне, где может наблюдаться локальный замор [3, 4]. Летом и осенью в воде отмечается присутствие альготоксинов (микроцистины и другие), которые в дальнейшем могут накапливаться в донных отложениях, зообентосе и рыбах [5, 6].

Многолетние гидрохимические исследования Куршского залива, проводимые Атлантическим филиалом ФГБНУ «ВНИРО», ранее позволили

сделать оценки гидрохимического состава, загрязнения и первичной продуктивности российской акватории Куршского залива в целом без пространственного анализа по отдельным районам [7, 8]. Вместе с тем значительный интерес представляет пространственная дифференциация гидрохимических показателей для локализации неблагоприятных условий и анализа их сезонной и многолетней изменчивости. Куршский залив, особенно его российская часть, является непростым объектом для такого пространственного деления, т. к. в нем отсутствует выраженная дифференциация на основе морфометрических и гидрологических особенностей или антропогенного воздействия. Ранее анализ пространственного распределения гидрохимических показателей Куршского залива не выполнялся, в отличие от других водоемов региона, в частности от Вислинского залива, в котором удалось проследить многолетние тенденции гидрохимического состава и загрязнения вод в отдельных районах [9]. В настоящей работе предложено первое пространственное деление российской акватории Куршского залива на основе сезонных исследований гидрохимических показателей, выполненных в 2018–2022 гг. на всей российской акватории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование гидрохимических условий в Куршском заливе проводилось на протяжении безледного периода с апреля по ноябрь 2018–2022 гг. в рамках комплексного исследования водных биологических ресурсов и среды их обитания. Расположение 11 стандартных станций мониторинга позволяет охватить всю российскую акваторию (рис. 1), а периодичность исследования позволила оценить сезонные изменения гидрохимических показателей. Всего в 2018–2022 гг. было проведено 17 съемок, в ходе которых выполнены исследования на 182 станциях.

Пробы воды отбирали в подповерхностном слое (0–0,5 м). Перечень определяемых на всех станциях параметров включал растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода (БПК₅), водородный показатель (рН), минеральные формы биогенных элементов (фосфор фосфатов, аммонийный азот, азот нитритов и азот нитратов). Химический анализ выполняли в аккредитованной лаборатории стандартными методами [10, 11].

Для всех исследуемых показателей, за исключением азота нитратов, применялась одна методика на протяжении всего периода (2018–2022 гг.). Азот нитратов в 2019–2020 гг. определяли по методу с салициловокислым натрием, который в сравнении с многолетними данными [7] периодически демонстрировал завышенные результаты, поэтому в 2021–2022 гг. применяли метод с кадмиевым редуктором и реактивом Грисса.

Для российской акватории Куршского залива, исходя из физико-географических и гидрологических условий [1, 12], а также интенсивности поступления загрязняющих веществ, предложено деление на 6 районов, характеризующихся следующими особенностями (рис. 1):

- I (залив Теплый) — расположен в юго-западной части Куршского залива, имеет сравнительно небольшую для российской части глубину (около 2 м), наиболее удален от Клайпедского пролива и устья р. Неман (в т. ч. от основного течения, направленного от устья реки к проливу) и характеризуется наиболее продолжительным периодом обновления вод на протяжении всего года. В западную часть впадает небольшая река Зеленоградка.
- II (западный район) — вытянут вдоль побережья Куршской косы, имеет продолжительный период обновления вод, особенно летом, который уменьшается к центру залива. Вдоль его восточной границы находятся наиболее глубоководные участки (более 4 м) и практически отсутствуют источники внешней биогенной нагрузки.
- III (центральный район) — преимущественно глубоководный (более 4 м), имеет промежуточный между другими районами период обновления вод, сильно изменяющийся в зависимости от сезона и снижающийся весной [1, 12].
- IV (восточный район) — мелководный; вдоль восточного берега расположены пойменные земли и впадают реки Матросовка (рукав р. Неман) и Немонин и ряд каналов. Из-за влияния речного стока имеет один из самых коротких периодов обновления вод в российской акватории, особенно в период половодья, а также испытывает повышенную биогенную нагрузку, прежде всего весной.

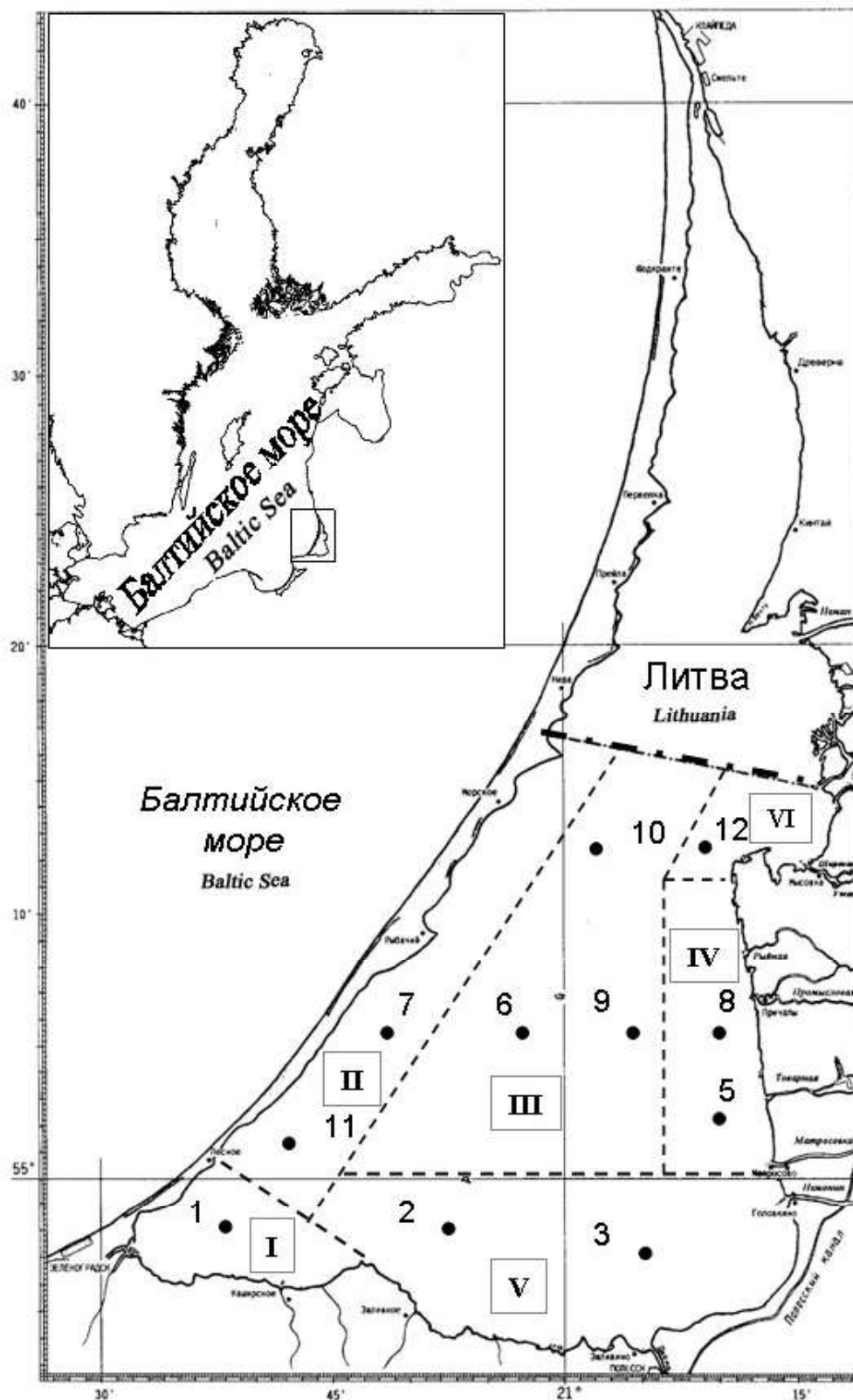


Рис. 1. Расположение станций отбора проб в Куршском заливе (I–VI — районы: I — зал. Теплый, II — западный, III — центральный, IV — восточный, V — южный, VI — неманский; 1–12 — мониторинговые станции)

Fig. 1. Location of the sampling stations in the Curonian Lagoon (I–VI — areas: I — Teply (Warm) Bay, II — western area, III — central area, IV — eastern area, V — southern area, VI — Neman River discharge zone; 1–12 — monitoring stations)

- V (южный район) — неглубокий район (менее 4 м), максимально удаленный от морского пролива. Имеет длительный период обновления вод. В юго-восточной части впадает р. Дейма, с речным стоком которой поступают биогенные элементы, в т. ч. из г. Полесска, расположенного рядом с побережьем.
- VI (неманский район) — неглубокий район (менее 4 м), расположенный у устья р. Неман. Характеризуется максимальной скоростью обновления вод на протяжении всего года [12] и сильнее остальных подвержен внешней биогенной нагрузке.

Для характеристики пространственной и сезонной изменчивости гидрохимических показателей данные, полученные для 11 мониторинговых станций, были усреднены для шести выделенных районов: зал. Теплый (станция № 1), западный (№ 7, 11), центральный (№ 6, 9, 10), восточный (№ 5, 8), южный (№ 2, 3) и неманский (№ 12) (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонная динамика гидрохимических условий рН, кислородный режим и биохимическое потребление кислорода

Куршский залив характеризуется высокими значениями рН, которые в отдельные месяцы в среднем для российской акватории в 2018–2022 гг. варьировали от 7,8 до 9,2 ед. рН. Сезонная динамика характеризовалась максимальными величинами летом, которые в июле 2021 и 2022 г. превышали 9,0 ед. рН. Осенью после снижения вегетации фитопланктона рН уменьшалось до 8,0 ед. рН и менее в ноябре. Пониженные величины рН также периодически наблюдаются весной, в частности в мае 2018 г., когда в столбе воды минерализация (деструкция) органического вещества в планктоне превышала его первичную продукцию (до 2 раз), несмотря на активный фотосинтез у поверхности. В другие периоды обычно наблюдается положительный баланс [7]. Пространственная изменчивость между отдельными районами, как правило, была незначительной. В отдельные периоды (весна–лето 2018 г., 2021 г.) значения водородного показателя в зал. Теплом были устойчиво ниже, чем в других районах; разница могла достигать 0,7 ед. рН. Среднее значение водородного показателя за весь период 2018–2022 гг. в данном районе составило 8,5 ед. рН, в остальных — 8,6–8,7 ед. рН (табл. 1).

Сезонная динамика концентраций растворенного кислорода в 2018–2022 гг. в целом соответствовала температуре воды. Максимальные концентрации весной были при низкой температуре воды (до 12,3–12,9 мгО/дм³ в среднем по акватории). Последующее летнее снижение происходило из-за прогрева вод и снижения растворимости кислорода, однако при интенсивном фотосинтезе в период «цветения» средний по акватории уровень мог достигать в июле 13,2 мгО/дм³. С осенним охлаждением вод вновь наблюдалось увеличение растворенного кислорода. Различия между районами в отдельные месяцы превышали 3,0 мгО/дм³, особенно летом, что связано с неоднородностью распределения фитопланктона и первичной продукции. Средние за 2018–2022 гг. концентрации кислорода были минимальны в западном районе (10,6 мгО/дм³), а максимума достигали в южном и восточном районах (11, 4 и 11,7 мгО/дм³). Однако весной среднее за 2018–2022 гг. содержание кислорода в зал. Теплом (12,3 мгО/дм³) было выше, чем на остальной акватории (11,7–12,0 мгО/дм³).

Степень насыщения вод кислородом в 2018–2022 гг. преимущественно была близка к 100 % или выше. Весной и летом, когда в заливе происходило интенсивное развитие фитопланктона, насыщение вод превышало 100 %. С апреля по август 2018–2022 гг. средние по акватории значения были 109–151 %. Пиковые величины наблюдались летом в период «цветения» вод. В октябре–ноябре насыщение снижалось до 96–101 % как результат снижения интенсивности фотосинтеза. Пространственная изменчивость между районами в основном соответствовала соотношению концентраций растворенного кислорода. Средняя за 2018–2022 гг. величина насыщения была наиболее высокой в восточном районе (124 %) и низкой — в западном (109 %). В летние месяцы диапазон значений возрастал (133 и 110 %, соответственно). Различия между районами в отдельные месяцы могли достигать 50 % и более (табл. 1).

Средние по акватории значения БПК₅ в 2018–2022 гг. варьировали от 3,2 до 9,6 мг/дм³. Наибольшие величины (до 8–12 мг/дм³) наблюдали летом в период интенсивного развития водорослей. Средняя за 2018–2022 гг. величина БПК₅ была наиболее высокой в зал. Теплом и в восточном районе, где отмечали «цветение» водорослей (более 5,5 мг/дм³) (табл. 1, рис. 2а).

Таблица 1. Растворенный кислород, биохимическое потребление кислорода и значения водородного показателя в разных районах Куршского залива в 2018–2022 гг.**Table 1.** Dissolved oxygen, biochemical oxygen demand and pH values in the different areas of the Curonian Lagoon in 2018–2022

Год Year	Месяц Month	Район / Area						Район / Area					
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
		Кислород, мг/дм ³ Oxygen, mg/dm ³						Кислород, % насыщения Oxygen, % saturation					
2018	Май / May	11,5	10,8	10,3	10,0	10,3	9,7	140	125	128	125	122	120
	Июнь / June	10,6	9,8	10,3	10,7	10,9	10,6	115	104	110	116	116	113
	Июль / July	9,3	8,4	9,0	12,1	10,1	10,0	106	95	103	140	115	114
	Авг. / Aug.	9,7	10,0	10,4	11,8	12,2	12,3	108	111	117	134	138	138
	Нояб. / Nov.	10,5	11,0	11,8	–	11,6	11,5	89	93	99	–	99	97
2019	Июль / July	10,7	10,6	10,9	11,4	11,4	11,3	121	120	125	129	131	130
	Авг. / Aug.	9,6	9,1	9,8	10,0	10,0	9,5	111	104	114	116	115	110
2020	Апр. / Apr.	13,2	12,6	13,1	13,1	12,8	12,8	122	115	120	122	116	119
	Май / May	13,3	11,7	12,1	11,7	11,2	11,8	124	109	115	103	102	113
	Июль / July	13,2	10,1	10,4	10,7	11,2	10,1	142	110	115	118	125	112
	Окт. / Oct.	11,3	11,8	10,5	11,3	11,8	10,7	98	104	93	100	103	95
2021	Июнь / June	8,8	10,0	10,2	11,8	10,6	9,9	98	112	115	134	117	113
	Июль / July	9,6	9,2	10,6	11,1	9,7	9,6	114	111	129	136	118	117
	Окт. / Oct.	12,1	11,1	11,4	12,0	11,5	11,4	105	97	101	105	101	101
2022	Апр. / Apr.	11,3	12,0	12,4	12,5	12,5	13,0	103	106	110	111	111	116
	Июль / July	11,7	11,0	12,7	15,1	15,2	13,4	130	122	143	174	177	153
		БПК ₅ , мгО/дм ³ BOD ₅ , mgO/dm ³						рН, ед. pH, unit					
2018	Май / May	8,8	7,4	7,1	6,7	7,4	6,4	8,0	8,7	8,5	8,5	8,6	8,4
	Июнь / June	9,7	7,2	7,2	7,7	7,9	7,3	8,4	8,7	8,6	8,7	8,7	8,7
	Июль / July	6,6	6,0	6,2	8,5	6,0	6,6	8,2	8,5	8,5	8,4	8,4	8,5
	Авг. / Aug.	8,2	7,7	8,8	10,7	11,0	12,3	–	–	–	–	–	–
	Нояб. / Nov.	3,8	3,0	3,3	–	3,7	2,6	7,8	7,8	7,9	–	7,7	7,9
2019	Июль / July	5,1	3,8	4,7	5,0	4,8	4,8	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	8,7
	Авг. / Aug.	8,2	5,7	6,3	6,8	6,5	5,2	9,1	9,0	8,9	9,0	8,8	8,9
2020	Апр. / Apr.	8,3	6,8	6,5	6,1	6,6	5,7	8,8	9,0	8,9	8,9	8,9	8,9
	Май / May	6,2	4,2	5,7	4,7	4,3	4,4	8,7	8,8	8,8	8,7	8,8	8,8
	Июль / July	5,9	3,1	3,6	4,0	3,8	4,2	8,7	8,8	8,9	8,9	8,9	8,9
	Окт. / Oct.	4,2	4,9	3,0	4,0	4,5	3,4	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,5
2021	Июнь / June	2,8	3,1	3,8	5,2	3,8	3,5	8,4	8,6	8,7	8,8	8,4	8,7
	Июль / July	6,3	4,5	5,6	5,6	4,8	4,3	8,9	9,0	9,0	9,1	9,0	9,0
	Окт. / Oct.	5,1	4,2	3,9	4,2	4,4	3,7	–	–	–	–	–	–
2022	Апр. / Apr.	5,1	4,3	4,3	4,4	4,4	5,1	8,5	8,7	8,7	8,8	8,6	8,7
	Июль / July	8,1	5,1	5,2	6,8	6,9	5,9	9,2	9,3	9,2	9,3	9,2	9,2

Примечание: I — зал. Теплый, II — западный, III — центральный, IV — восточный, V — южный, VI — неманский район

Note: I — Teply (Warm) Bay, II — western area, III — central area, IV — eastern area, V — southern area, VI — Neman River discharge zone

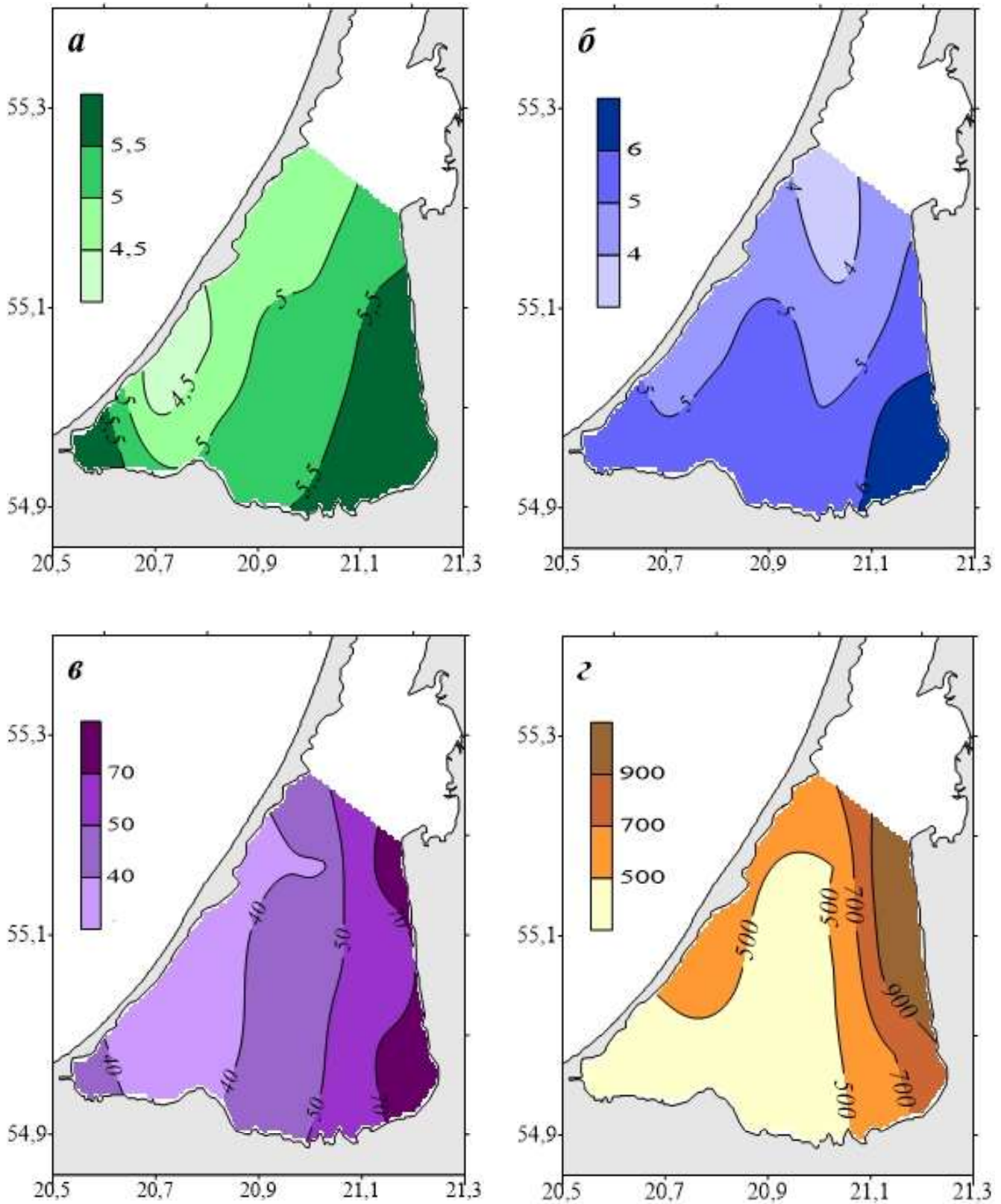


Рис. 2. Пространственное распределение гидрохимических показателей в Куршском заливе: БПК₅ в июле 2018–2022 гг. (а), фосфор фосфатов в июле 2019–2022 гг. (б), аммонийный азот в июле 2019–2022 гг. (в), азот нитратов в апреле 2020–2022 гг. (г)

Fig. 2. Spatial distribution of hydrochemical parameters in the Curonian Lagoon: BOD₅ in July, 2018–2022 (а), phosphate phosphorus in July, 2019–2022 (б), ammonium nitrogen in July, 2019–2022 (в), and nitrate nitrogen in April, 2020–2022 (г)

Весной различия были еще более выражены: 7,1 и 5,4–5,9 мг/дм³. Летом максимум наблюдали в зал. Теплом и в восточном районе (6,8 и 6,7 мг/дм³ при 5,2–6,2 мг/дм³ в остальных районах акватории). Пространственные различия между районами весной и летом достигали 2,5–4,5 мг/дм³, составляя в среднем за период 2018–2022 гг. 1,7 мг/дм³. Вне зависимости от сезона или района БПК₅ устойчиво превышало ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения (2,1 мг/дм³), характеризуя высокий уровень эвтрофирования и обилия фитопланктона в Куршском заливе, который наблюдается на протяжении длительного периода [7].

Минеральные формы биогенных элементов

Фосфор фосфатов. Большую часть периода наблюдений в 2019–2022 гг. средние по акватории Куршского залива концентрации фосфора фосфатов были ниже 10 мкгР/дм³. В частности, весной они изменялись в пределах 2–9 мкгР/дм³. Летом могли отмечаться как минимальные (1 мкгР/дм³ в июле 2020 г.), так и повышенные (в среднем 13 мкгР/дм³ в июле 2019 г.) значения, что могло определяться динамикой процессов развития фитопланктона и минерализации органического вещества, а также поступлением фосфора из донных отложений. В июле–августе наблюдаются максимальные за год величины минерализации (деструкции) органического вещества в столбе воды (1,3–11,9 гС·м⁻²·сут⁻¹), которые обычно совпадают с максимумом первичной продукции планктона в период «цветения» воды и на 60–90 % осуществляются за счет деятельности бактерий [7]. На формирование «цветения» воды в летний период влияет благоприятное для синезеленых водорослей стехиометрическое соотношение азота и фосфора за счет увеличения концентраций фосфатов [7, 13]. Как показал ряд исследований, в летний период при стратификации вод в придонном слое, который всегда лежит глубже зоны фотосинтеза, могут формироваться анаэробные условия, которые приводят к кратковременному значительному поступлению минерального фосфора в столб воды и стимулируют развитие «цветения» [13, 14]. При этом в поверхностном слое насыщение вод кислородом обычно выше 100 % (табл. 1), за исключением редких случаев скопления и разложения больших масс синезеленых водорослей, когда даже в прибрежной зоне (на удалении до сотен метров от берега) могут в течение

нескольких дней формироваться анаэробные условия [4, 7].

Высокая изменчивость концентраций фосфора фосфатов осенью (4–19 мкгР/дм³) также может быть обусловлена различиями во времени окончания периода вегетации фитопланктона и началом аккумуляции минеральных форм биогенных элементов, связанных с температурным режимом данного года (табл. 2).

Большую часть периода наблюдений, в т. ч. в летние месяцы, районы российской акватории не демонстрировали значимых пространственных различий, кроме июля 2019 г., когда содержание фосфора фосфатов в восточном районе (17 мкгР/дм³) было выше, чем на остальной акватории (11–14 мкгР/дм³). Среднее содержание фосфора фосфатов в летний период, когда происходит «цветение» водорослей, в разных районах составляло 4–6 мкгР/дм³, а в среднем за вегетационный период (апрель–октябрь) в 2019–2022 гг. — 6–7 мкгР/дм³ (табл. 2, рис. 26).

Минеральный азот. Сезонная динамика аммонийного азота в 2019–2022 гг. характеризовалась летним увеличением. Средние по акватории величины весной составляли 8–54 мкгN/дм³, летом — 28–95 мкгN/дм³, осенью — 14–30 мкгN/дм³. Пространственное различие концентраций аммонийного азота наблюдается большую часть вегетационного периода. Средние за вегетационный период (апрель–октябрь) 2019–2022 гг. уровни были наиболее высокими в восточном, неманском районах и зал. Теплом — 47, 42 и 36 мкгN/дм³, соответственно, низкими — в западном и южном (25 и 30 мкгN/дм³). Повышенное содержание аммонийного азота (до 70 мкгN/дм³ и выше) отмечалось в восточном и неманском районах летом (рис. 2в). Осенью наиболее высокие концентрации были в зал. Теплом (33 мкгN/дм³ при диапазоне 15–24 мкгN/дм³ в остальных районах). В отдельные месяцы между районами могла наблюдаться значительная изменчивость. В частности, в июле 2020 г. в неманском районе величина аммонийного азота (116 мкгN/дм³) была многократно выше, чем в других районах (12–48 мкгN/дм³) (табл. 2).

Средние по акватории концентрации азота нитритов в 2019–2022 гг. изменялись в пределах диапазона 1–9 мкгN/дм³. Сезонная изменчивость характеризовалась увеличением концентраций азота нитритов в летние месяцы. Диапазон ве-

Таблица 2. Фосфор фосфатов, аммонийный азот, азот нитритов и азот нитратов в разных районах Куршского залива в 2018–2022 гг.

Table 2. Phosphate phosphorus, ammonium nitrogen, nitrite nitrogen, and nitrate nitrogen in the different areas of the Curonian Lagoon in 2018–2022

Год Year	Месяц Month	Район / Area						Район / Area					
		I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
		Фосфор фосфатов, мкг/дм ³ Phosphate phosphorus, µg/dm ³						Аммонийный азот, мкг/дм ³ Ammonium nitrogen, µg/dm ³					
2019	Июль / July	14	12	11	17	12	12	92	73	97	133	78	92
	Авг. / Aug.	5	2	2	3	5	1	58	44	34	51	53	19
2020	Апр. / Apr.	1	2	1	2	1	3	11	7	11	29	7	14
	Май / May	2	2	1	2	1	2	7	8	7	12	7	12
	Июль / July	1	2	1	2	2	1	48	13	13	12	29	116
	Окт. / Oct.	8	4	5	2	4	4	47	10	12	10	10	10
2021	Июнь / June	2	3	2	5	4	5	24	14	24	99	17	14
	Июль / July	5	5	5	4	7	4	34	22	23	53	19	63
	Сент. / Sept.	17	20	20	17	17	19	5	15	28	22	14	29
	Окт. / Oct.	16	13	17	16	16	20	48	22	31	29	32	29
2022	Апр. / Apr.	5	6	5	4	7	5	43	64	47	55	50	72
	Июль / July	3	1	2	2	2	2	10	17	47	65	41	39
		Азот нитритов, мкг/дм ³ Nitrite nitrogen, µg/dm ³						Азот нитратов, мкг/дм ³ Nitrate nitrogen, µg/dm ³					
2019	Июль / July	6	6	5	6	6	5	92	102	99	102	96	185
	Авг. / Aug.	7	8	7	7	7	7	209	154	160	163	182	154
2020	Апр. / Apr.	6	6	5	5	3	5	98	366	211	674	99	1096
	Май / May	2	2	2	3	2	2	148	157	160	168	123	111
	Июль / July	7	7	6	7	7	7	99	86	97	93	89	80
	Окт. / Oct.	6	5	3	4	5	4	25	37	45	31	43	31
2021	Июнь / June	4	5	6	11	6	4	15	14	15	186	13	14
	Июль / July	3	3	3	4	4	4	3	1	1	4	2	1
	Сент. / Sept.	1	2	2	2	2	2	3	1	2	2	1	2
	Окт. / Oct.	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1
2022	Апр. / Apr.	3	2	1	1	1	1	724	727	755	1057	689	1170
	Июль / July	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Примечание: I — зал. Теплый, II — западный, III — центральный, IV — восточный, V — южный, VI — неманский район

Note: I — Teply (Warm) Bay, II — western area, III — central area, IV — eastern area, V — southern area, VI — Neman River discharge zone

сенних концентраций составил 1–5 мкгN/дм³, летних — от 1 до 7 мкгN/дм³, осенних — от 1 до 4 мкгN/дм³. Пространственная изменчивость концентраций азота нитритов между различными районами была невысокой. Среднее содержание за 2019–2022 гг. во всех районах составило 4 мкгN/дм³, а за летний период — 5–6 мкгN/дм³.

В отдельных районах летом могли отмечаться повышенные концентрации; в частности, в июне 2021 г. повышенные значения наблюдали в восточном районе (11 мкгN/дм³ при диапазоне 4–6 мкгN/дм³ в других районах) (табл. 2).

Сезонная динамика концентраций азота нитратов в 2019–2022 гг. характеризовалась пиковыми

значениями весной и последующим снижением из-за его интенсивного потребления фитопланктоном. Концентрации в апреле–мае в среднем по акватории составили 149–828 мкгN/дм³. Летние уровни сильно варьировали, составляя в среднем по акватории 2–167 мкгN/дм³. Значительная межгодовая вариация могла быть обусловлена интенсивностью развития фитопланктона и использования азота нитратов в разные годы: в июле 2021–2022 гг. концентрации хлорофилла «а» (47 и 50 мкг/дм³ в поверхностном слое в среднем по заливу) были в 2–3 раза выше, чем в 2019 и 2020 гг. (27 и 18 мкг/дм³). В то же время на регистрацию высоких величин мог оказать влияние метод анализа, применяемый в 2019–2020 гг., поэтому полученные в эти годы данные можно использовать как ориентировочные для анализа пространственной изменчивости. Осенью содержание азота нитратов было достаточно низким (1–38 мкгN/дм³), что свидетельствует об интенсивной вегетации фитопланктона и потреблении азота до октября. Значительная пространственная изменчивость содержания азота нитратов наблюдается весной. В частности, в апреле 2020 и 2022 гг. концентрации в восточном (674 и 1057 мкгN/дм³, соответственно) и неманском (1096 и 1170 мкгN/дм³) районах значительно превышали величины в других районах (98–366 и 689–755 мкгN/дм³) (табл. 2, рис. 2г). Летом различия между районами, как правило, были невысокими: среднее содержание в 2019–2022 гг. в разных районах составило 71–109 мкгN/дм³. Однако в отдельные месяцы могло наблюдаться значительное различие; в частности, в июне 2021 г. содержание азота нитратов в восточном районе (186 мкгN/дм³) было десятикратно выше, чем на остальной акватории (13–15 мкгN/дм³) (табл. 2).

Пространственная изменчивость гидрохимических условий

Согласно многолетним исследованиям гидробиологических и гидрохимических показателей трофического статуса, Куршский залив можно характеризовать как гипертрофный водоем. Летом и осенью в заливе наблюдается «цветение» воды из-за массового развития потенциально токсичных синезеленых водорослей (р. *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Planktothrix*), которые могут формировать неблагоприятные для водных биологических ресурсов условия среды (превышение ПДК по

ряду гидрохимических показателей, локальный замор рыб и др.). Наиболее сильно эвтрофирование и «цветение» воды выражены в российской части (75 % акватории), где условия исключительно благоприятны для синезеленых водорослей: замедленный водообмен (около 1 год⁻¹), пресноводность, прогрев воды летом до 23–26 °С [2, 4, 7]. Данные условия среды различаются по акватории Куршского залива в результате влияния как речного стока, так и жизнедеятельности фитопланктона, что может проявляться в пространственном распределении гидрохимических показателей.

Залив Теплый в 2018–2022 гг. неоднократно демонстрировал повышенные или более низкие в сравнении с остальной акваторией уровни растворенного кислорода и насыщения вод, а также устойчивое превышение БПК₅ и более низкие значения водородного показателя, что может свидетельствовать о специфичности процессов эвтрофирования в данном районе. В период весеннего паводка в зал. Теплом наблюдали минимальное содержание азота нитратов вследствие удаленности от основного внешнего источника биогенных элементов — р. Неман. Относительная закрытость, меньшая скорость водообмена и больший прогрев в данном районе могут обуславливать формирование более благоприятных условий для развития фитопланктона весной и особенно летом для синезеленых водорослей. Это, в частности, отражается на повышенных величинах БПК₅ в зал. Теплом (рис. 3а). Скопление и разложение водорослей может обуславливать превышение минерализации (деструкции) органического вещества над первичной продукцией и благоприятствовать потенциальному формированию анаэробных условий, что ранее наблюдалось в расположенной рядом прибрежной зоне у Куршской косы [4, 7].

Влияние речного стока сильнее всего проявлялось в восточном и неманском районах — прежде всего, в виде высокой концентрации азота нитратов в период половодья в апреле. Также в июне 2021 г. в восточном районе содержание всех минеральных форм азота было многократно выше в сравнении с остальной акваторией, что может свидетельствовать о внешнем антропогенном загрязнении. В летний период интенсивного развития водорослей в восточном районе отмечены повышенные в сравнении с остальной акваторией величины растворенного кислорода, БПК₅ и аммонийного азота

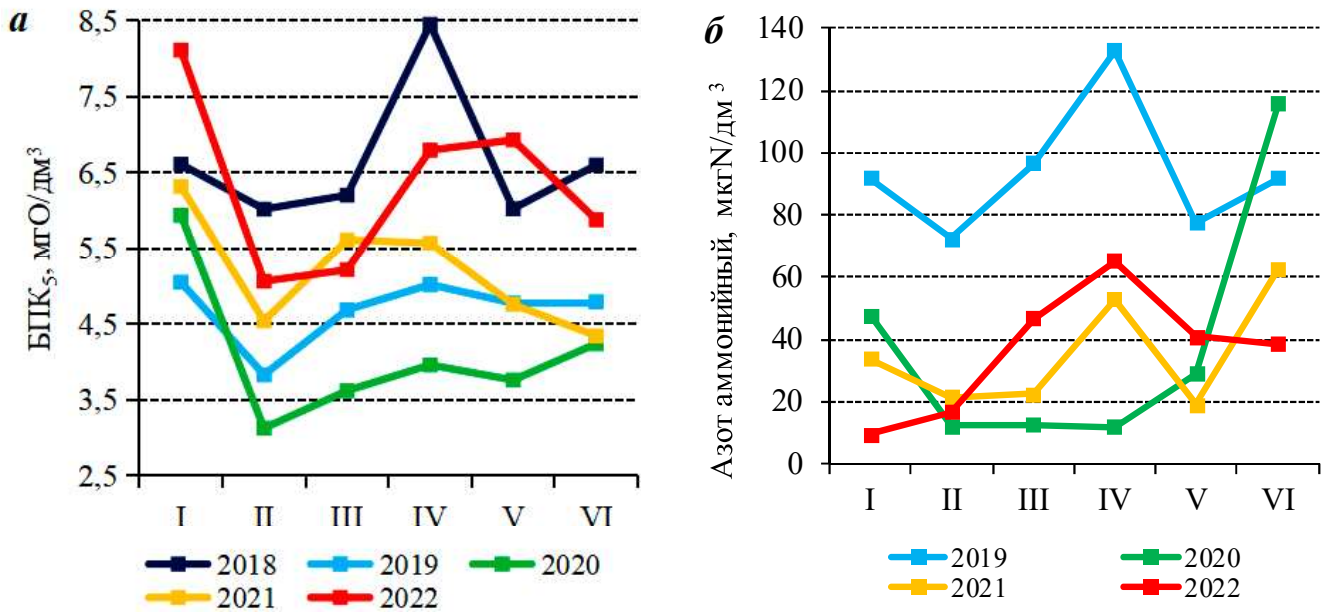


Рис. 3. Среднеиюльские значения БПК₅ (а) и аммонийного азота (б) в разных районах Куршского залива (I — зал. Теплый, II — западный, III — центральный, IV — восточный, V — южный, VI — неманский)

Fig. 3. Average July BOD₅ (a) and ammonium nitrogen (б) values in the different areas of the Curonian Lagoon (I — Teply (Warm) Bay, II — western area, III — central area, IV — eastern area, V — southern area, VI — Neman River discharge zone)

(рис. 3а, 3б). Из-за значительного речного стока повышенная биогенная нагрузка является фактором эвтрофирования и «цветения» вод, но вместе с тем более быстрый водообмен в восточном и неманском районах снижает вероятность возникновения и масштаб бескислородных условий с возможным замором рыб.

В неманском районе в 2019–2022 гг. наблюдали пиковые значения концентраций азота нитратов в апреле в период паводков, а также повышенные величины аммонийного азота в июле при «цветении» вод. Отличия гидрохимических условий в неманском районе от остальной акватории также могут быть обусловлены близостью к течению, направленному от дельты р. Неман к Клайпедскому проливу и выраженному весной, в то время как южнее на основной российской акватории скорость преимущественно ветровых течений и водообмена (>190 дней) невелика [1].

Для западного района характерны более низкие величины концентрации минеральных форм биогенных элементов, а также БПК₅, растворенного кислорода и насыщения воды, как следствие отсутствия крупных источников биогенной нагрузки. На песчаной Куршской косе, относящейся к национальному парку, нет крупных населен-

ных пунктов и отсутствуют реки. На состояние вод также влияет глубокководность относительно остальной акватории залива, что в совокупности может свидетельствовать о менее интенсивных процессах эвтрофирования в данном районе. При этом непосредственно в прибрежной зоне в период «цветения» ранее отмечалось снижение растворенного кислорода до нуля и гибель гидробионтов, включая рыб, из-за ветрового сгона и разложения больших масс водорослей [4].

В южном районе залива, который характеризуется относительно небольшой глубиной и длительным периодом обновления вод, концентрации азота нитратов в среднем за 2019–2022 гг. были минимальными для российской акватории, особенно весной из-за незначительного поступления речного стока, а содержание других минеральных форм было ниже или близко к средним уровням. Близкими к средним были значения концентраций кислорода, БПК₅ и водородного показателя.

Особенностью центральной части российской акватории было промежуточное положение величин гидрохимических показателей между граничащими районами. В частности, концентрации азота нитратов весной были промежуточными между

восточным и неманским районами, близкими к устью р. Неман, и западным и южным районами. Средние концентрации аммонийного азота также характеризовались промежуточным уровнем. В июле в отдельные годы значения приближались к среднему по акватории или нижней границе диапазона изменчивости (рис. 3б). Величины растворенного кислорода, БПК₅ и водородного показателя также занимали промежуточное положение между повышенным уровнем на востоке и сниженными показателями на западе залива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидрохимические условия в Куршском заливе в значительной степени определены геоморфологическими и гидрологическими особенностями, в частности, мелководностью, слабым водообменом с морем, преобладанием в водном балансе речного стока, а также жизнедеятельностью фитопланктона, особенно в период «цветения» вод. Биогенные элементы в основном поступают со стоком р. Неман. Условия среды различаются по акватории, что проявляется в пространственном распределении гидрохимических показателей. Для российской акватории предложено деление на 6 районов (залив Теплый, западный, центральный, восточный, южный и неманский районы), для которых выполнен анализ гидрохимических показателей в 2018–2022 гг.

Гидрохимические условия в заливе Теплом — неглубоком, со слабым водообменом — характеризовались значительным отклонением концентраций растворенного кислорода, в особенности повышенными летом, а также высокими величинами БПК₅ и аммонийного азота летом в результате «цветения» вод и одновременно низкими — азота нитратов из-за небольшого речного стока. Для западного района, вытянутого вдоль Куршской косы, были характерны более низкие величины минеральных форм биогенных элементов, а также БПК₅, растворенного кислорода и степени насыщения вод. В южном районе наблюдались более низкие концентрации азота нитратов, особенно весной; концентрации других минеральных форм биогенных элементов, кислорода, БПК₅ также были ниже или близки к средним уровням. Особенностью центральной части российской акватории было промежуточное положение величин гидрохимических показателей между граничащими районами и, в целом, соответствие средним

по российской акватории значениям. Восточный и неманский районы, подверженные значительному влиянию стока р. Неман, характеризовались высокой концентрацией азота нитратов в период половодья, а также повышенными величинами аммонийного азота и БПК₅ летом при «цветении» вод. Из-за значительного речного стока биогенная нагрузка является фактором эвтрофирования и «цветения» вод, но вместе с тем более быстрый водообмен в восточном и неманском районах снижает вероятность возникновения замора рыб.

Гидрохимические исследования выполнены в рамках госзадания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00007-22-00, анализ пространственного распределения — в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferrarin C., Razinkovas A., Gulbinskas S., Umgieser G., Bliūdžiūtė L. Hydraulic regime-based zonation scheme of the Curonian Lagoon // *Hydrobiologia*. 2008. Vol. 611, no. 1. Pp. 133–146. doi: 10.1007/s10750-008-9454-5.
2. Александров С.В. Экологическое состояние Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование : матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Керчь, 19–23 сентября 2018 г.). Симферополь: Ариал, 2018. С. 142–147.
3. Александров С.В. Влияние «цветения» синезеленых водорослей на экологическое состояние Куршского залива // *Вода: химия и экология*. 2009. № 4 (10). С. 2–6.
4. Aleksandrov S.V., Krek A.V., Bubnova E.S., Danchenkov A.R. Eutrophication and effects of algal bloom in the Curonian Lagoon alongside the south-western part of the Curonian Spit (Russia) // *Baltica*. 2018. Vol. 31, no. 1. Pp. 1–12. doi: 10.5200/baltica.2018.31.01.
5. Смирнова М.М. Микроцистины в литорали Куршского залива в 2017 г. по данным иммунохроматографического анализа // *Морской биологический журнал*. 2019. Т. 4, № 1. С. 109–111. doi: 10.21072/mbj.2019.04.1.10.
6. Bukaveckas P.A., Lesutienė J., Gasiūnaitė Z.R., Ložys L., Olenina I., Pilkaitytė R., Pūtyš Z., Tassone S., Wood J. Microcystin in aquatic food webs of the Baltic and Chesapeake Bay regions // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017. Vol. 191. Pp. 50–59. doi: 10.1016/j.ecss.2017.04.016.
7. Александров С.В. Первичная продукция планктона в лагунах Балтийского моря (Вислинский и Куршский заливы). Калининград: Изд-во АтлантНИРО, 2010. 228 с.

8. Сташко А.В., Шендерюк В.В., Касьян А.В., Александров С.В., Виноградова Л.Л. Содержание минеральных форм биогенных элементов в Куршском заливе в 2018 году // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 111–121.
9. 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. doi: 10.46845/1997-3071-2021-60-11-21.
10. Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О.К. Бордовского, В.Н. Иваненкова. М.: Наука, 1978. 272 с.
11. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Под ред. В.В. Сапожникова, А.И. Агатовой, Н.В. Аржановой, Н.В. Мордасовой, Н.М. Лапиной, В.Л. Зубаревич, О.Н. Лукьяновой, Н.И. Торгуновой. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
12. Umgiesser G., Zemlys P., Erturk A., Razinkova-Baziukas A., Mèžinè J., Ferrarin C. Seasonal renewal time variability in the Curonian Lagoon caused by atmospheric and hydrographical forcing // Ocean Science. 2016. Vol. 12, no. 2. Pp. 391–402. doi: 10.5194/os-12-391-2016.
13. Bartoli M., Zilius M., Bresciani M., Vaiciute D., Vybernaite-Lubiene I., Petkuvienė J., Giordani G., Daunys D., Ruginis T., Benelli S., Giardino C., Bukaveckas P.A., Zemlys P., Griniene E., Gasiunaite Z.R., Lesutiene J., Pilkaitytė R., Baziukas-Razinkovas A. Drivers of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon // Frontiers in Marine Science. 2018. Vol. 5. e434. doi: 10.3389/fmars.2018.00434.
14. Petkuvienė J., Zilius M., Lubiene I., Ruginis T., Giordani G., Razinkovas-Baziukas A., Bartoli M. Phosphorus cycling in a freshwater estuary impacted by cyanobacterial blooms // Estuaries and Coasts. 2016. Vol. 5, no. 39. Pp. 1386–1402. doi: 10.1007/s12237-016-0078-0.
1. Ferrarin C., Razinkovas A., Gulbinskas S., Umgiesser G., Bliūdžiūtė L. Hydraulic regime-based zonation scheme of the Curonian Lagoon. *Hydrobiologia*, 2008, vol. 611, no. 1, pp. 133–146. doi: 10.1007/s10750-008-9454-5.
2. Aleksandrov S.V. Ekologicheskoe sostoyanie Kurshskogo i Vislinskogo zalivov Baltijskogo morya [Ecological state of Curonian and Vistula Lagoons of the Baltic Sea]. In: *Biologicheskoe raznoobrazie: izuchenie, sokhranenie, vosstanovlenie, ratsional'noe ispol'zovanie : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (g. Kerch', 19–23 sentyabrya 2018 g.) [Biological diversity: study, conservation, restoration, and rational exploitation. Proceedings of the International Research and Practice Conference (Kerch, 19–23 September, 2018)]*. Simferopol: Arial, 2018, pp. 142–147. (In Russian).
3. Aleksandrov S.V. Vliyanie “tsveteniya” sinezelenykh vodorosley na ekologicheskoe sostoyanie Kurshskogo zaliva [Impact of blue-green algae “nuisance” on ecological status of the Curonian Lagoon]. *Voda: khimiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology]*, 2009, no. 4 (10), pp. 2–6. (In Russian).
4. Aleksandrov S.V., Krek A.V., Bubnova E.S., Danchenkov A.R. Eutrophication and effects of algal bloom in the Curonian Lagoon alongside the south-western part of the Curonian Spit (Russia). *Baltica*, 2018, vol. 31, no. 1, pp. 1–12. doi: 10.5200/baltica.2018.31.01.
5. Smirnova M.M. Mikrotsistiny v litorali Kurshskogo zaliva v 2017 g. po dannym immunokhromatograficheskogo analiza [Presence of microcystins in the littoral zone of the Curonian Lagoon by the data of immunochromatographic analysis in 2017]. *Morskoy biologicheskij zhurnal [Marine Biological Journal]*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 109–111. doi: 10.21072/mbj.2019.04.1.10. (In Russian).
6. Bukaveckas P.A., Lesutienė J., Gasiūnaitė Z.R., Ložys L., Olenina I., Pilkaitytė R., Pūtys Z., Tassone S., Wood J. Microcystin in aquatic food webs of the Baltic and Chesapeake Bay regions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, vol. 191, pp. 50–59. doi: 10.1016/j.ecss.2017.04.016.
7. Aleksandrov S.V. Pervichnaya produktsiya planktona v lagunakh Baltijskogo morya (Vislinskiy i Kurshskiy zalivy) [Primary plankton production in the Baltic Sea lagoons (the Vistula and Curonian Lagoons)]. Kaliningrad: AtlantNIRO [Atlantic Scientific Research Institute for Marine Fishery and Oceanography] Publ., 2010, 228 p. (In Russian).
8. Stashko A.V., Shenderyuk V.V., Kasyan A.V., Aleksandrov S.V., Vinogradova L.L. Soderzhanie mineral'nykh form biogennykh elementov v Kurshskom zalive v 2018 godu [Mineral nutrients content in the Curonian Lagoon in 2018]. *Izvestiya KGTU [KSTU News]*, 2019, no. 55, pp. 111–121. (In Russian).
9. Aleksandrov S.V., Stashko A.V. Prostranstvennoe 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 [KSTU News]*, 2021, no. 60, pp. 11–21. doi: 10.46845/1997-3071-2021-60-11-21. (In Russian).
10. Metody gidrokhimicheskikh issledovaniy okeana [Methods of hydrochemical studies of the ocean]. O.K. Bordovskiy, V.N. Ivanenkov (Eds.). Moscow: Nauka [Science], 1978, 272 p. (In Russian).
11. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskome monitoringe

- rybokhozyaystvennykh vodoemov i perspektivnykh dlya promysla rayonov Mirovogo okeana [Guidelines for the chemical analysis of marine and fresh waters in the context of environmental monitoring of the water bodies of fishery importance and commercially promising areas of the World Ocean]. V.V. Sapozhnikov, A.I. Agatova, N.V. Arzhanova, N.V. Mordasova, N.M. Lapina, V.L. Zubarevich, O.N. Lukyanova, N.I. Torgunova. Moscow: VNIRO Publ., 2003, 202 p. (In Russian).
12. Umgiesser G., Zemlys P., Erturk A., Razinkova-Baziukas A., Mėžinė J., Ferrarin C. Seasonal renewal time variability in the Curonian Lagoon caused by atmospheric and hydrographical forcing. *Ocean Science*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 391–402. doi: 10.5194/os-12-391-2016.
 13. Bartoli M., Zilius M., Bresciani M., Vaiciute D., Vybernaite-Lubiene I., Petkuvienė J., Giordani G., Daunys D., Ruginis T., Benelli S., Giardino C., Bukaveckas P.A., Zemlys P., Griniene E., Gasiunaite Z.R., Lesutiene J., Pilkaitytė R., Baziukas-Razinkovas A. Drivers of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon. *Frontiers in Marine Science*, 2018, vol. 5, e434. doi: 10.3389/fmars.2018.00434.
 14. Petkuvienė J., Zilius M., Lubiene I., Ruginis T., Giordani G., Razinkovas-Baziukas A., Bartoli M. Phosphorus cycling in a freshwater estuary impacted by cyanobacterial blooms. *Estuaries and Coasts*, 2016, vol. 5, no. 39, pp. 1386–1402. doi: 10.1007/s12237-016-0078-0.

Поступила 27.09.2022

Принята к печати 14.12.2022