

Ю. А. Спирин¹, С. И. Зотов², В. С. Таран³, С. А. Янковский⁴

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕК ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ОСЕННИМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ СЕЗОНАМ

АННОТАЦИЯ

Объектом нашего исследования стал бассейн реки Анграпы, обладающий трансграничным статусом и состоящий в основном из малых рек первой и высшей категории рыбохозяйственного значения. С целью объективной оценки загрязненности водосбора выбраны реки, которые смогли бы его в должной мере охарактеризовать: Писса, Красная, Русская и непосредственно сама р. Анграпа. На момент 1 марта 2024 г. проведены шесть последовательных сезонных полевых выездов, начиная с осени 2022 г. и заканчивая зимой 2024 г. В обозначенный период наибольшая загрязненность водотоков зафиксирована осенью 2022 г., поэтому внимания заслуживает вопрос динамики сложившейся ситуации. С этой целью был проведен сравнительный анализ химического состава и индекса загрязнения воды осенью 2022 г. и 2023 г. на предмет динамики загрязняющих веществ. Для каждого водотока определены 4 точки от верховья до устья, в которых измерены гидрологические параметры и отобраны пробы воды для химических анализов. Рассчитаны кратности превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) по большому перечню химических элементов, определен индекс загрязнения воды (ИЗВ) и соответствующий ему класс качества воды в исследуемых реках. Проведено картографирование и выявлена пространственная дифференциация ИЗВ и кратностей превышения ПДК различных показателей. В дальнейшем полученные результаты были сопоставлены между собой, что сформировало понимание о пространственно-временной изменчивости рассматриваемых характеристик и факторов, влияющих на них. Исследование показало, что увеличение водности осенью 2023 г. по отношению к осени 2022 г. благоприятно сказалось на качестве воды. Выявленное пространственное загрязнение складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается с рядом особенностей. В качестве основных загрязнителей осенью 2023 г. выделены: нефтепродукты, железо, БПК₅, растворенный кислород. Другие загрязнители оказывают влияние локально, и не так широко распространены этой осенью по всему бассейну, к ним относятся: аммоний, хлориды, фосфаты и ХПК.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: динамика загрязнения водотоков, бассейн реки Анграпы, гидрохимический анализ, качество вод, картографирование загрязнения рек

¹ Институт географии РАН, лаборатория гидрологии, ул. Вавилова, д. 37, Москва, Россия, 117312, *e-mail:* spirin.yuriy@rambler.ru

² Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail:* zotov.prof@gmail.com

³ Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail:* ronya.volkova@yandex.ru

⁴ Балтийский федеральный университет имени И. Канта, Высшая школа живых систем, ул. Университетская, д. 2, Калининград, Россия, 236041, *e-mail:* yankov-sky@mail.ru

Yuri A. Spirin¹, Sergey I. Zotov², Veronika S. Taran³, Serafim A. Yankovsky⁴

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF RIVERS POLLUTION IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE KALININGRAD REGION BY AUTUMN HYDROLOGICAL SEASONS

ABSTRACT

The object of our study was the Angrapa River basin, which has transboundary status and consists mainly of small rivers of the first and highest category of fishery importance. In order to objectively assess the pollution of the catchment area, the rivers that could adequately characterize it were selected: Pissa, Krasnaya, Russkaya and directly the Angrapa River itself. As of March 1, 2024, six consecutive seasonal field trips were carried out, starting in the fall of 2022 and ending in winter of 2024. During the specified period, the highest pollution of watercourses was recorded in the fall of 2022, so the issue of the dynamics of the current situation deserves attention. For this purpose, a comparative analysis of the chemical composition and water pollution index was carried out in the fall of 2022 and 2023 for the dynamics of pollutants. For each watercourse, 4 points were identified from the headwaters to the mouth, where hydrological parameters were measured and water samples were taken for chemical analysis. The multiples of exceeding the maximum permissible concentrations (MPC) for a large list of chemical elements were calculated, the water pollution index (WPI) and the corresponding water quality class in the studied rivers were determined. Mapping was carried out and spatial differentiation of WPI and multiples of exceeding the MPC of various indicators was revealed. Subsequently, the obtained results were compared with each other, which formed an understanding of the spatio-temporal variability of the characteristics under consideration and the factors influencing them. The study showed that the increase in water content in the fall of 2023 compared to the fall of 2022 had a beneficial effect on water quality. The identified spatial pollution is formed in a traditional way — water quality from source to mouth deteriorates with a number of features. The main pollutants in the fall of 2023 were: oil products, iron, BOD₅, dissolved oxygen. Other pollutants have a local effect and are not so widespread this fall throughout the basin, they include: ammonium, chlorides, phosphates and COD.

KEYWORDS: dynamics of watercourse pollution, Angrapa River basin, hydrochemical analysis, water quality, river pollution mapping

ВВЕДЕНИЕ

Речная сеть Калининградской области представляет собой важный источник водных ресурсов, необходимых для обеспечения потребностей региона, однако с ростом индустриализации и урбанизации экологическое состояние водотоков стало предметом озабоченности населения [Нагорнова и др., 2011, 2014; Нагорнова, 2012; Ахмедова и др., 2015; Zotov и др., 2021; Zotov, Spirin, 2022]. Современное состояние водных объектов в

¹ Institute of Geography, Russian Academy of Science, Laboratory of Hydrology, 37, Vavilova str., Moscow, 117312, Russia, *e-mail*: spirin.yuriy@rambler.ru

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail*: zotov.prof@gmail.com

³ Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail*: ronya.volkova@yandex.ru

⁴ Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Living Systems, 2, Universitetskaya str., Kaliningrad, 236041, Russia, *e-mail*: yankov-sky@mail.ru

значительной степени характеризуется как загрязненное¹. Для разработки эффективной стратегии водоохранной и водозащитной деятельности необходимо иметь доступ к достоверным гидрохимическим данным по водным объектам, однако такая информация часто остается недоступной. Осуществление сезонного мониторинга по гидрохимическим параметрам водотоков является ключевым инструментом для анализа текущей экологической ситуации в регионе. Важность таких мероприятий усиливается в свете отсутствия у региона сухопутной границы с основной частью Российской Федерации.

Объектом нашего исследования выбраны реки юго-восточной части Калининградской области, относящиеся к бассейну реки Анграпы. Это реки Писса, Красная, Русская и непосредственно сама р. Анграпа (рис. 1). Интерес для изучения именно этой территории подробно описан в публикации [Спирин и др, 2023], поэтому тезисно его можно выразить в следующих аспектах: высотная расчлененность ландшафтов, связанная с особенностями рельефа; ООПТ, находящаяся в границах исследуемого бассейна — природный парк «Виштинецкий»; трансграничность водосбора в верховьях рек, расположенных на территории Польши, сопряженность различных природно-хозяйственных условий местности, активная сельскохозяйственная деятельность и умеренная урбанизация.



Рис. 1. Картограмма водосборного бассейна р. Анграпы относительно РФ, Литвы, Польши, Калининградской области и ее муниципалитетов
 Fig. 1. Map of the drainage basin of the river Angrapa regarding: Russian Federation, Lithuania, Poland, Kaliningrad region and its municipalities

¹ Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2021 году». Калининград: ООО «ВИА Калининград», 2022. 51 с.

На момент 1 марта 2024 г. проведены шесть последовательных сезонных полевых выездов, начиная с осени 2022 г. и заканчивая зимой 2024 г. В обозначенный период наибольший уровень загрязнения водотоков отмечался осенью 2022 г. [Спирин и др, 2023], поэтому внимания заслуживает вопрос динамики сложившейся ситуации. Для этого необходимо сопоставить данные осени 2022 и 2023 гг., чтобы выявить потенциальные закономерности загрязнения от циклов природной и антропогенной активности, присущие данному сезону. В связи с этим формируется следующая цель работы: провести сравнительный анализ и оценить пространственно-временную изменчивость уровней химического загрязнения в рамках двух последовательных осенних гидрологических сезонов в бассейне р. Анграпы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор водотоков и пунктов для гидрохимического мониторинга осуществлялся таким образом, чтобы дать объективную сравнительную картину пространственно-временной динамики содержания загрязняющих веществ. Более подробно с методикой выбора водотоков можно ознакомиться в нашей прошлой работе [Спирин и др., 2023]. Картограмма наблюдений представлена на рис. 2, а расположение пунктов мониторинга — в табл. 1.

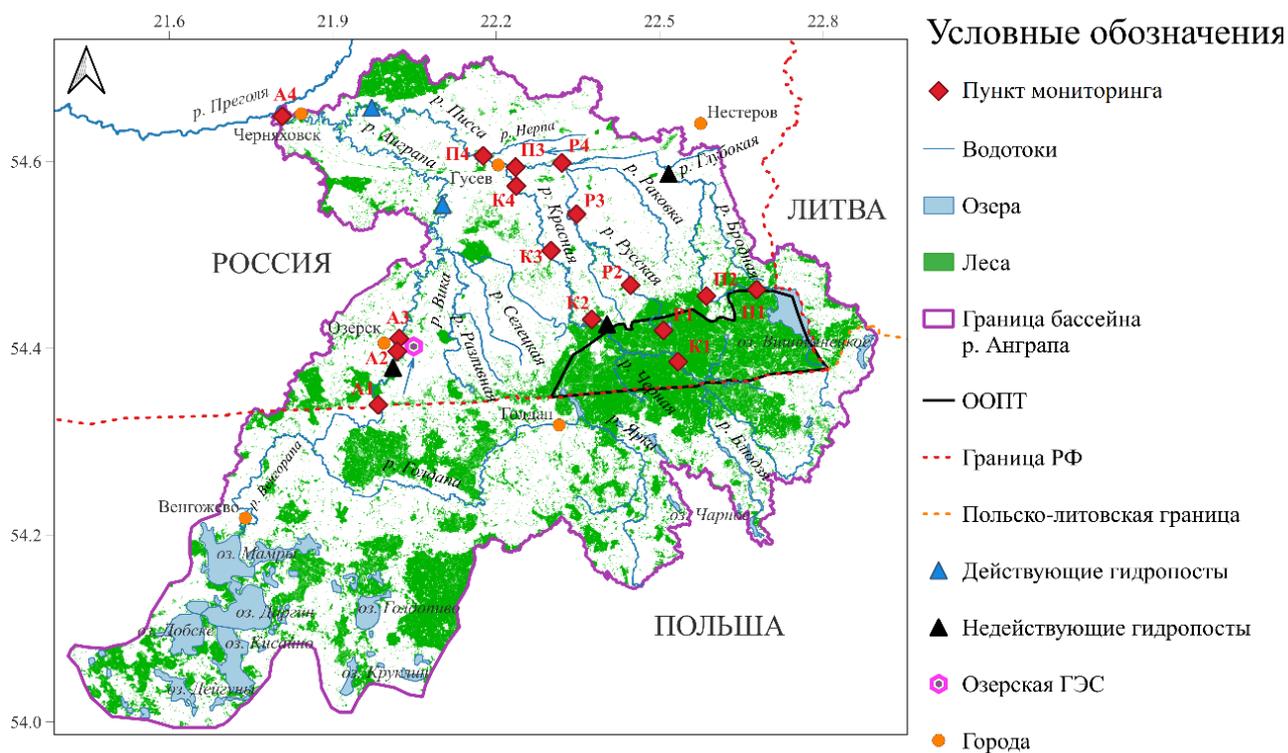


Рис. 2. Картограмма расположения исследуемых водотоков и локация пунктов мониторинга воды
 Fig. 2. Map of the location of the researched watercourses and the location of water monitoring points

Табл. 1. Выбранные реки и местоположение пунктов мониторинга
Table 1. Selected rivers and locations of monitoring points

№	Река Анграпа (А)	Река Писса (П)	Река Русская (Р)	Река Красная (К)
1	п. Междулесье	п. Ягодное	п. Пугачево	п. Радужное
2	с. Минское	п. Калинино	п. Чистые пруды	п. Токаревка
3	г. Озерск	п. Брянское	п. Новостроевка	п. Ольховатка
4	г. Черняховск	г. Гусев	п. Подгоровка	п. Липово

Полевые исследования на реках были осуществлены в два осенних гидрологических сезона: 15.10.2022 и 15.10.2023. Отмечены следующие гидрометеорологические условия сезонов по метеостанции г. Черняховск: осень 2022 г. (средняя температура воздуха — 8,2 °С, сумма осадков — 146 мм), осень 2023 г. (средняя температура воздуха — 9,9 °С, сумма осадков — 320 мм). Химические анализы проб проведены на основе стандартных методик в лаборатории Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта. Соблюдена унифицированность методов исследования для корректного сравнения данных по двум выездам [Спирин и др., 2023]. Определены показатели взвешенных веществ, растворенного кислорода, биохимического потребления кислорода (БПК₅), химического потребления кислорода, нитратов, нитритов, аммония, фосфатов, сухого остатка, хлоридов, сульфатов, натрия, магния, калия, кальция, железа, нефтепродуктов, солености. С использованием совмещенного списка предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ из нормативных документов¹ рассчитаны кратности превышения ПДК гидрохимических показателей и индекс загрязнения воды (ИЗВ)².

Границы водосборов исследуемых рек построены на базе SRTM снимков в программном пакете SAGA GIS с использованием стандартного встроенного инструментария [Ермолаев и др., 2018; Чумаченко и др., 2018; Балдаков, Кудишин, 2019; Lata, 2020]. Качество воды в реках можно рассматривать как интегральный показатель экологической обстановки на их водосборах. Исходя из этого допущения были построены схемы пространственной дифференциации ИЗВ и основных загрязняющих веществ [Нагорнова, 2012; Джамалов и др., 2019; Зотов, Спирин, 2022; Lättchen et al., 2021]. Структура работы строится по принципу представления полученных осенью 2023 г. данных, через призму сравнения их с прошлым осенним сезоном 2022 г., информация по которому представлена здесь [Спирин и др., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты полевых и лабораторных химических анализов за осень 2023 г. занесены в табл. 4, пункты маркированы в соответствии с картосхемой на рис. 2. Полу жирным выделены используемые при расчете ИЗВ показатели, исходя из описанной ранее методики.

¹ «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 10 марта 2020 года)». Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/420389120>. (дата обращения 19.03.23). СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения». Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/901798042> (дата обращения 19.03.23)

² Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. 5 с.

Табл. 2 Гидрохимические показатели водотоков водосборного бассейна реки Анграпы (осень 2023 г.)
Table 2. Hydrochemical indicators of watercourses in the catchment area of the river Angrapa (autumn 2023)

Водотоки	Река Анграпа				Река Писса				Река Русская				Река Красная			
Пункты отбора	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	Р1	Р2	Р3	Р4	К1	К2	К3	К4
Цветность, градусы	10	10	15	10	5	5	10	25	15	25	25	25	5	5	5	5
Запах, баллы	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	0	1	0	0	0
Мутность, мг/л	5	5	10	15	5	5	5	15	30	5	15	20	5	5	10	20
t воды, °С	9,6	3,9	4,4	4,3	12,1	11,7	8,2	4,5	10,8	10,4	10,0	11,6	10,9	11,5	11,3	12,2
pH, ед	7,5	7,8	7,9	7,4	7,8	7,4	8,0	7,6	7,1	7,2	7,2	8,0	7,8	7,7	7,7	7,8
Взвеш. вещ., мг/л	0,45	0,12	0,10	0,12	1,76	0,33	0,17	0,13	5,75	0,71	0,84	0,80	0,24	0,01	0,31	0,32
Раств. О ₂ , мг/л	10,23	8,91	9,16	8,72	5,71	3,11	2,42	2,38	0,51	2,52	1,10	10,83	11,87	6,41	4,85	3,12
ХПК, мг/л	12,4	15,5	5,0	20,7	5,0	8,0	12,5	35,6	78,1	102,3	70,0	17,8	5,0	5,0	5,0	12,9
БПК ₅ , мг/л	1,1	3,0	5,1	2,0	2,2	0,3	5,0	4,2	2,5	2,0	10,9	1,4	3,4	3,6	4,0	3,4
Нитраты, мг/л	2,54	3,29	1,97	4,26	0,80	9,92	0,84	6,54	7,85	4,66	18,80	3,06	1,35	1,81	1,85	1,62
Нитриты, мг/л	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,265	0,001	0,001	0,001	0,001	0,156
Аммоний, мг/л	0,097	0,099	0,088	0,089	0,222	0,056	0,097	0,906	1,161	0,324	5,090	0,126	0,057	0,075	0,084	0,065
Фосфаты, мг/л	0,099	0,075	0,058	0,063	0,031	0,002	0,018	0,691	0,413	0,190	0,005	0,021	0,001	0,002	0,002	0,012
Сухой остаток, мг/л	0,42	0,24	0,32	0,38	0,18	0,43	0,22	0,78	1,26	0,15	0,09	1,48	0,03	0,11	0,19	0,14
Хлориды, мг/л	31,8	241,1	234,9	242,3	62,9	683,0	90,9	362,6	2444	157,9	730,0	3702	121,5	118,5	67,6	99,1
Сульфаты, мг/л	193,6	196,4	201,5	200,7	114,5	114,1	130,6	147,4	132,2	124,9	22,6	148,0	164,5	93,3	104,0	96,9
Натрий, мг/л	32,97	17,05	17,22	20,01	12,96	5,58	9,35	34,01	53,12	19,35	30,36	141,4	3,63	7,31	23,37	6,97
Магний, мг/л	11,80	13,59	13,73	13,64	9,98	8,89	9,38	25,88	22,34	14,03	16,94	23,09	7,53	12,25	13,84	12,51
Железо, мг/л	0,256	0,112	0,164	0,213	0,350	0,245	0,108	0,111	0,847	0,916	0,541	0,442	0,645	0,506	0,487	0,335
Нефтепродукты, мг/л	0,09	0,15	0,33	0,19	0,13	0,18	0,41	1,08	1,14	0,53	0,46	0,31	0,04	0,09	0,07	0,07
Соленость, мг/л	0,42	0,31	0,28	0,34	0,26	0,31	0,21	0,77	1,57	0,58	0,52	1,81	0,31	0,49	0,26	0,25
Калий, мг/л	3,90	3,96	4,43	4,70	3,67	2,84	4,09	7,56	9,34	8,48	16,01	9,39	2,07	2,23	2,75	2,26
Кальций, мг/л	56,45	60,90	60,08	59,84	52,31	39,75	41,97	157,8	139,9	69,55	98,19	103,7	35,24	64,60	67,82	65,23

На основе химических показателей из табл. 4 рассчитаем ИЗВ за осень 2023 г. для каждого пункта мониторинга и сравним полученный результат со значениями для осени 2022 г. (рис. 3).

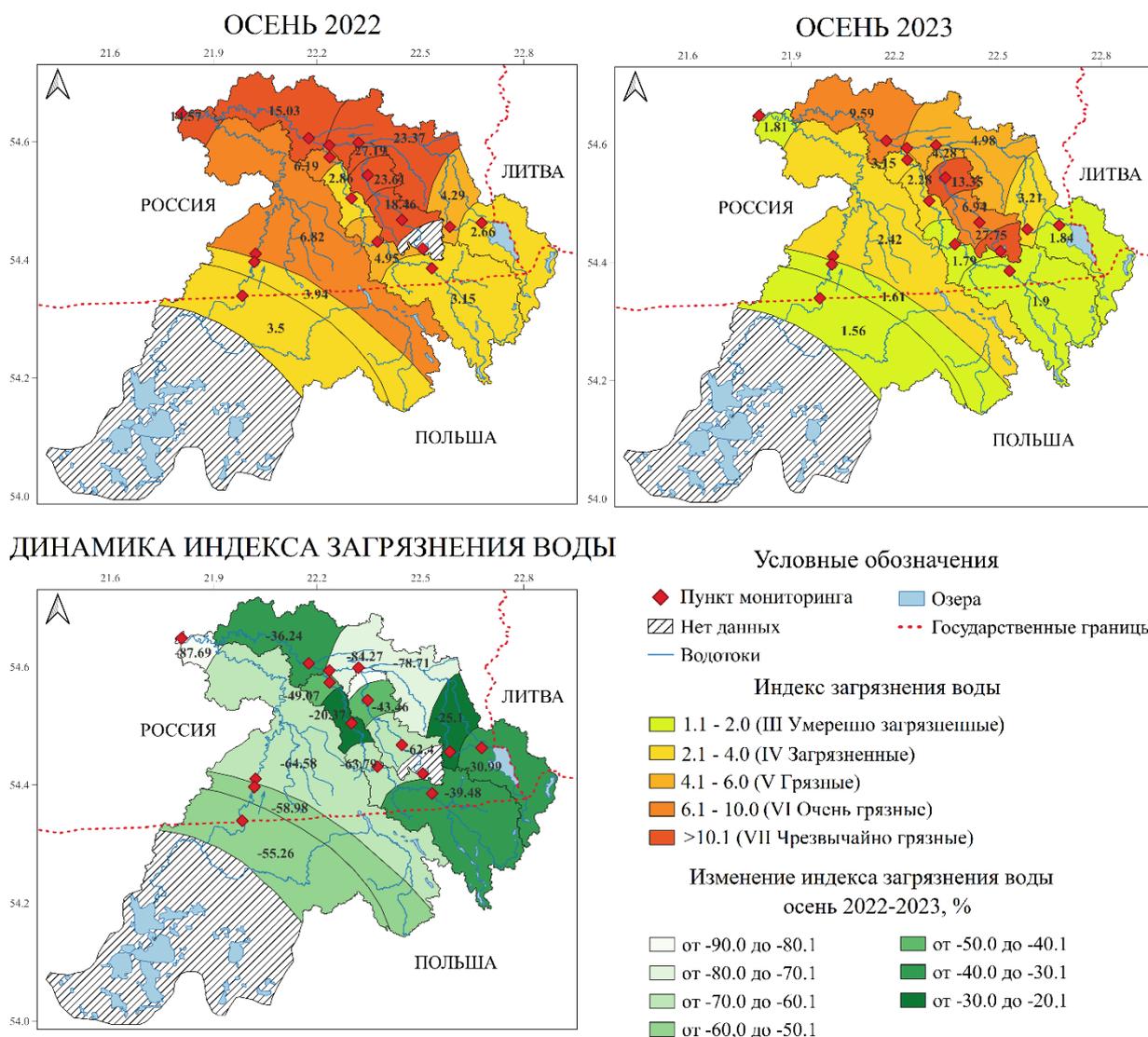


Рис. 3. Пространственно-временная дифференциация ИЗВ в бассейне р. Анграпы за осень 2022–2023 г.

Fig. 3 Spatiotemporal differentiation of WPI in the Angrapa River basin for autumn 2022–2023

Исходя из представленной информации на рис. 3, ситуация с загрязнением бассейна осенью 2023 г. улучшилась по отношению к осени 2022 г., но все еще местами достаточно напряженная. Значение ИЗВ по каждому суббассейну в среднем снизилось следующим образом: в суббассейне р. Анграпы на 5,38 единиц (66,63 %), что привело к изменению класса качества воды с VI (очень грязные) до III (умеренно загрязненные); в суббассейне р. Писсы на 6,44 единицы (42,76 %), что привело к изменению класса качества воды с VII (чрезвычайно грязные) до V (грязные); в суббассейне р. Русской на 14,90 единицы (63,38 %), что не привело к изменению класса качества воды, он остался на уровне VII (чрезвычайно грязные); в суббассейне р. Красной на 2,00 (43,17 %), что привело к изменению класса

качества воды с V (грязные) до IV (загрязненные). Одной из основных причин подобной динамики на наш взгляд является различие в водности.

В это время могут регистрироваться как меженные, так и паводковые периоды, из-за климатических особенностей и преобладания малых водотоков в регионе [Наумов, Ахмедова, 2017; Спирин, 2020; Наумов, 2022]. Осенью 2023 г. зафиксирован нетипично сильный паводок, что связано с выпадением обильных осадков. По данным метеостанции г. Черняховска из архива погоды rp5¹, в период с 01.08.2023 по 15.10.2023 выпало 323 мм осадков (из них 100 мм с 01.10.2023 по 15.10.2023). Если сравнивать эти показатели с прошлой осенью, когда в период с 01.08.2022 по 15.10.2022 выпало 117 мм осадков (из них 27 мм с 01.10.2024 по 15.10.2024), то наблюдается увеличение осадков почти в 3 раза, а по осадкам, выпавшим в первой половине октября, почти в 4 раза. Для сравнения, приблизительная климатическая норма осадков за оперативный период (1991–2020) на рассматриваемой территории составляет 190 мм. Достоверность полученных данных с rp5 была проверена путем сопоставления их с данными ВНИИГМИ-МЦД² по ближайшим к объекту исследования метеостанциям г. Советска и г. Калининграда (г. Черняховск в их системе отсутствует), что показало идентичную ситуацию с количеством выпавших осадков в аналогичный период, предшествующий осенним выездам 2022 и 2023 гг.

Но тем не менее, когда речь заходит про описание фаз водного режима рек Калининградской области, особенно относительно малых водотоков, то порой сложно выделить конкретные периоды межени, паводка и половодья. По участкам реки, на которых не проводят систематических гидрологических наблюдений, стоит проводить дальнейший анализ в рамках водности того или иного момента времени. Осенью 2023 г. водность выше, чем была прошлой осенью 2022 г., и, как следствие, уровень загрязнения снизился (рис. 4).

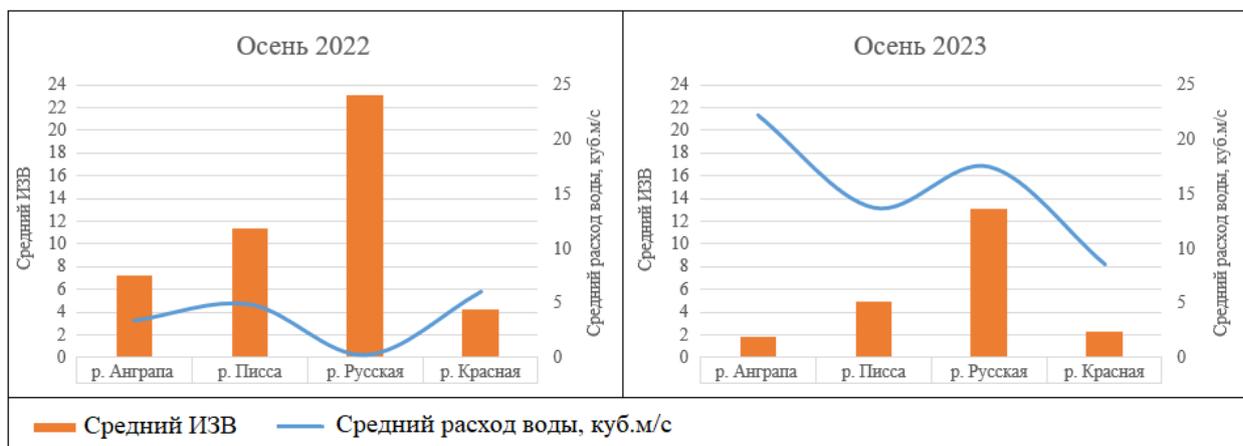


Рис. 4. Средние ИЗВ по каждой реке и средние расходы воды в реке во время пробоотбора за осень 2022–2023 г.

Fig. 4. Average WPI for each river and average water flow in the river during sampling for the fall of 2022–2023

¹ rp5.ru расписание погоды. Электронный ресурс: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Черняховске. (дата обращения 19.03.23)

² Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных. Электронный ресурс: <http://meteo.ru/data>. (дата обращения 19.03.23)

Из рис. 4 видно, как возрастающая водность приводит к уменьшению показателей ИЗВ. С ростом расхода по отдельным рекам падает ИЗВ, и наоборот, в некоторых случаях даже наблюдается зависимость между этими характеристиками, но в целом здесь пока не выстраивается устойчивая связь. Осредненные разовые расходы воды по всем пунктам увеличились с 3,68 м³/с осенью 2022 г. до 15,52 м³/с осенью 2023 г., а средний сезонный ИЗВ соответственно уменьшился с 11,49 до 5,53, что привело к улучшению класса качества воды в бассейне с VII (чрезвычайно грязные) до V (грязные). Поэтому в целом состояние бассейна р. Анграпы улучшилось, но произошло это по большей части из-за разбавления концентраций химических веществ возросшим речным стоком.

Как и в прошлом году, фиксируется классическая ситуация ухудшения качества воды от истока к устью, но со своими особенностями. Проанализируем ситуацию в каждом из суббассейнов за осень 2023 г.

В суббассейне р. Анграпы сохранилась схожая с прошлым годом пространственная динамика ИЗВ, когда между пунктами А1 и А2 разницы в показателях почти нет, а в пункте А3 по отношению к пункту А2 происходит рост ИЗВ на 50–70 %. Как и ранее, этот закономерный рост объясняется прохождением водотока через г. Озерск. Динамика индекса в реке не вызывала бы вопросов и хорошо ложилась на классическую закономерность загрязнения, если не его величина в пункте А4, которая равна 1,81. Это ниже в 8 раз, чем годом ранее, и соответствует III классу качества воды. При этом впадающая неподалеку от места отбора проб р. Писса в пункте П4 имела ИЗВ, равный 9,59. В другие сезоны мы также отмечали, что пункт А4 почти всегда чище предшествующего ему пункта А3, как в принципе наблюдается и сейчас, но это фиксировалось с тем условием, что в пункте П4 показатели также находятся в схожих значениях, а это в данном случае не так. Рассматриваемая локация является устьевой частью всего бассейна, здесь располагается г. Черняховск, поэтому такие результаты не совсем укладываются в стандартную картину загрязнения. Расходы здесь не сильно отличаются от А1–А3 и П1–П4. Есть вероятность того, что в данном предустьевом участке происходит активный водообмен между р. Анграпой и более крупной р. Преголей, которая потенциально может иметь более высокое качество воды. Для более детального анализа ситуации требуются дальнейшие наблюдения.

Суббассейн р. Русской по аналогии с прошлым годом, да и с другими сезонами, остался самым загрязненным. Но и здесь фиксируется не совсем однозначная динамика загрязнения воды. В верховье р. Русской, где расположен пункт Р1, в этот раз отмечен самый высокий за все 5 выездов ИЗВ, равный 27,75, и это несмотря на высокую водность данного сезона. Далее, в пункте Р2, индекс уменьшается до 6,94, что отчасти объясняется возросшим в 4 раза расходом воды. Потом, когда водоток достигнет пункта Р3, показатель загрязнения возрастает до 13,35, а в устьевой части, где расположился пункт Р4, он опускается до 4,28. Как и в случае с р. Анграпой, есть вероятность того, что вода из более чистой в данном секторе р. Писсы (об этом можно судить по данным П3–П4) смешалась с водой из Р4. Летом 2023 г. была отмечена схожая пространственная тенденция, но выделить закономерность, опираясь лишь на 2 случая, не представляется возможным.

В суббассейнах р. Красной и р. Писсы в этом сезоне наблюдается постепенное ухудшение качества воды от истока к устью без дополнительных особенностей, которые присутствовали прошлой осенью. В границах парка Виштынецкого качество воды высокое, и оно начинает ухудшаться по мере того, как реки проходят через урбанизированные и сельскохозяйственные территории. Если выражать пространственную изменчивость в числах, то от пункта К1 до пункта К4 ИЗВ увеличился в 1,67 раз, а от пункта П1 до пункта П4 — в 5,21 раза. Это привело к падению класса качества воды вдоль р. Красной с III

(умеренно загрязненные) до IV (загрязненные), а для р. Писсы — с III (умеренно загрязненные) до VI (очень грязные).

С целью детализации ситуации с загрязнениями была построена пространственная дифференциация основных показателей, которые легли в основу почти каждого расчета индекса загрязнения воды. Для этого построены картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК по ним (рис. 5). Помимо этого, для понимания динамики изменения концентраций тех или иных веществ рассчитаны отклонения результатов измерения гидрохимических показателей осени 2023 г. относительно осени 2022 г. (табл. 5).

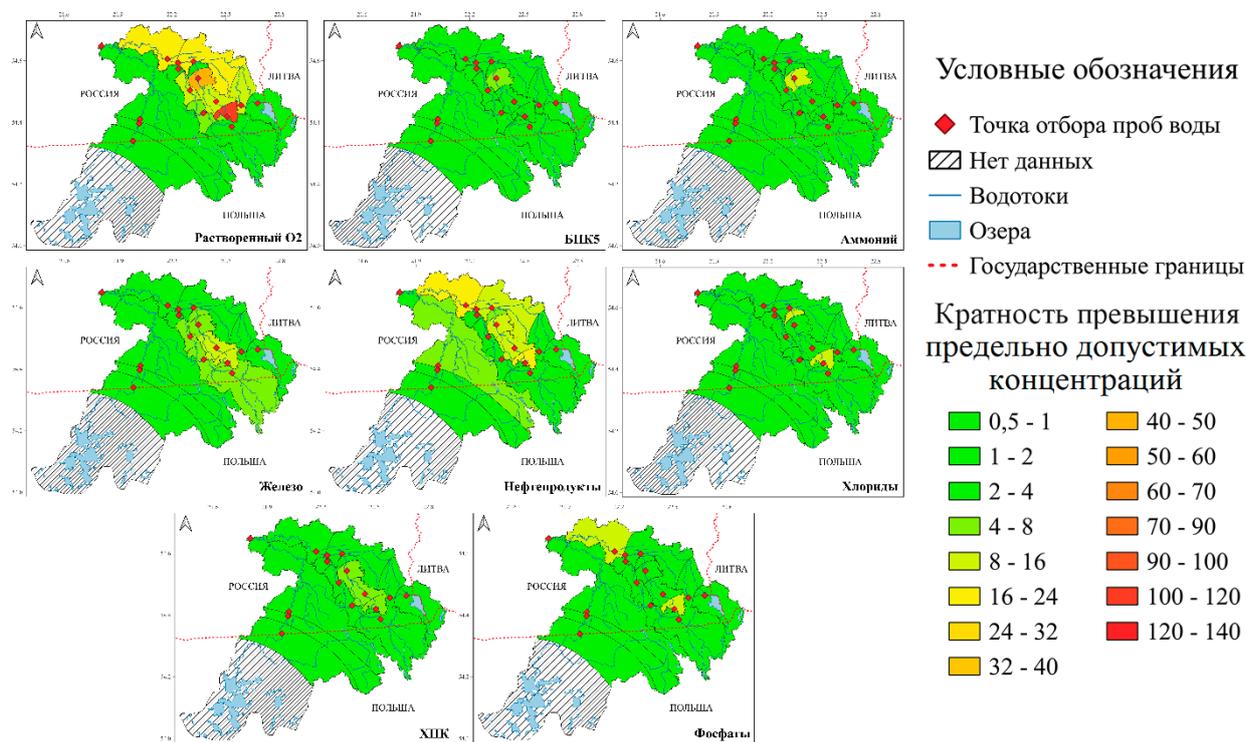


Рис. 5. Картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК в бассейне р. Анграпы по отдельным веществам за осень 2023 г.

Fig. 5. Maps of the spatial distribution of the multiplicity of exceeding the MPC in the Angra River basin for individual substances for autumn 2023

При сравнении загрязненности осени 2023 г. с осенью 2022 г., можно видеть ее снижение и небольшие изменения в перечне показателей, превышающих ПДК. Некоторые отмеченные загрязнители сильно выбиваются из общей гидрохимической характеристики всего бассейна и присущи лишь отдельным суббассейнам или их частям.

Например, превышения ПДК по хлоридам обнаружены по пунктам P1 (8,15 р.), P2 (2,43 р.) и P4 (12,34 р.), но при этом в пункте P3 (0,53 р.) превышений нет. По отношению к 2022 г. в пунктах P2 и P4 прирост по этому показателю составил 3233 % и 4857 %, соответственно. Причиной загрязнения в этих локациях мог послужить хлористый калий из удобрений, на это также указывает и небольшая синхронность колебаний между значениями хлоридов и калия. В суббассейне р. Русской по пяти сезонам коэффициент

парной корреляции Пирсона между ними составил 0,51, что косвенно может указывать на подобный вид загрязнения, но в то же время быть следствием и других процессов. К сожалению, сказанное не объясняет в полной мере причины сложившегося пространственного распределения вещества по мере течения реки, а источник их возникновения не более, чем гипотеза. Следует упомянуть, что в рассматриваемом сезоне рост хлоридов прослеживается почти по всем пунктам, но остается в пределах нормы.

Примерно то же самое можно сказать и про фосфаты, где превышения зафиксированы в пункте П4 (13,83 р.), Р1 (8,26 р.) и Р2 (3,80 р.). Но здесь несколько больше понимания пространственной изменчивости, т. к. в П4 это конечная точка водотока, и здесь мог быть разовый выброс, также как и в Р1, и он вниз по течению водотока разбавился. По остальным пунктам распределение концентраций идет более равномерно, как и в прошлом году. В целом они существенно уменьшились, за исключением ранее описанных пунктов и суббассейна р. Анграпы, где либо не было изменений, либо присутствует рост по пунктам А1 и А4, который привел к незначительному превышению 1,98 и 1,26.

Уровень нитритов и аммония также заметно снизился на всей территории бассейна р. Анграпы, и они теперь в норме или имеют незначительные превышения, кроме пункта Р3, где превышения по этим показателям составили 3,31 раз и 10,18 раз, а рост по отношению к прошлому сезону — 2551 % и 51 %. Нитраты хоть и возросли по всему бассейну в диапазоне 161–3187 %, но не превысили отметку ПДК.

Высокие концентрации ХПК выделяются в точках П4 (2,37), Р1 (5,21), Р2 (6,82), Р3 (4,67). Прирост по имеющимся данным следующий: П4 (282 %), Р2 (675 %) и Р3 (79 %). Во время отбора проб были отмечены неоднократные случаи мойки автотранспорта у реки. Моющие средства и содержащиеся в них жиры могут провоцировать рост ХПК. Помимо этого, моющие средства могут попадать и из источников городской и сельскохозяйственной среды, но проследить здесь системность все еще нельзя.

Остальные загрязнители, отнесенные к основным, совпадают с осенью 2022 г., с тем отличием, что они уменьшились на большей части бассейна в своем численном выражении (табл. 4). Данные загрязнители перманентные, прослеживаются в течение всех сезонов в большей или меньшей степени. Также они имеют отчетливое пространственное распределение, где наибольшему воздействию подвержены устьевые части водотоков, а наименьшим — их верховья и лесные территории. Показателями, которые в своей массе и задают тренд на класс качества воды, выступили нефтепродукты, железо, БПК₅, несоответствие норм ПДК по растворенному кислороду.

Главные загрязнители, вносящие наибольший негативный вклад в качество воды — это нефтепродукты и железо. Резкие изменения концентраций нефтепродуктов обусловлены антропогенным фактором и происходят после прохождения водотоками крупных по меркам района исследования населенных пунктов: гг. Черняховска, Озерска, Гусева. В меньшей степени водотоки загрязнены железом, что обусловлено высокими концентрациями этого вещества в подземных водах, питающих реки [Глуценко, 2008; Валл, Ахмедова, 2021]. Это может считаться в какой-то мере естественным фоном, но его численное выражение требует отдельной проработки. Как следствие, общего гидрохимического состояния бассейна и местами достаточно развитой флоры, которая в это время гибнет и окисляется, присутствует несоответствие норм ПДК по растворенному кислороду и БПК₅.

Table 5. Deviations in the results of measuring hydrochemical indicators in autumn 2023 relative to autumn 2022, %

Водотоки	Река Анграпа				Река Писса				Река Русская				Река Красная			
	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	P1	P2	P3	P4	K1	K2	K3	K4
Пункты отбора																
рН	-5	11	10	4	-1	1	5	4	-	-11	-8	11	-3	-4	-5	0
Раств. O ₂	35	29	40	24	-22	-59	-65	-68	-	3	-69	259	58	-8	-29	-61
ХПК	46	13	-62	84	-13	-40	12	282	-	675	79	-5	-21	-40	-3	-31
БПК ₅	-84	-57	-24	-65	-78	-98	-12	-13	-	-70	-43	-85	-11	-17	43	-64
Нитраты	674	1175	161	195	-2	894	9	758	-	537	3187	526	225	333	18	259
Нитриты	-100	-99	-99	-97	-90	-100	-99	-99	-	-90	2550	-90	-99	-90	-90	-51
Аммоний	-83	-94	-92	-92	-81	-95	-93	-35	-	-94	51	-96	-95	-69	-89	-95
Фосфаты	482	12	-25	425	15	-94	-80	753	-	228	-94	-73	-92	-99	-97	-89
Хлориды	-67	275	228	14	-6	950	57	547	-	-30	3233	4857	75	124	-25	65
Сульфаты	60	97	93	8	-10	-19	63	94	-	80	38	26	95	-26	-20	-14
Натрий	418	201	88	166	387	81	81	436	-	15	212	266	-18	34	466	25
Магний	44	79	45	112	84	55	39	208	-	20	14	34	-10	36	75	21
Железо	20	-42	-79	-71	12	-72	-85	-87	-	-74	-89	-85	-35	-32	-43	-59
Нефт. п.	-71	-77	-74	-95	-28	29	-93	-71	-	-75	-86	-94	-71	-86	-61	-92
Калий	36	55	43	60	86	109	79	77	-	43	738	8	88	10	-47	14
Кальций	23	48	19	79	88	31	17	221	-	14	-13	20	-32	44	40	6

ВЫВОДЫ

Осенью 2023 г. по пунктам мониторинга класс качества воды характеризуется следующим образом: умеренно загрязненные (А1-А2-А4-П1-К1-К2), загрязненные (А3-П2-К3-К4), грязные (П3-Р4), очень грязные (П4-Р2), чрезвычайно грязные (Р1-Р3). Общая картина загрязнения (за исключением некоторых нюансов) складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается. Самый загрязненный водоток — р. Русская со средним ИЗВ = 13,08, самый чистый — р. Красная со средним ИЗВ = 2,28. Хотя по величине данного параметра р. Красная и уступает р. Анграпе со средним ИЗВ = 1,85, но в ней загрязнения коррелируют с периодом отмирания растительности, в результате которого высвобождаются аккумулярованные ей вещества, что приводит к загрязнению [Tang et al., 2013; Xiong, 2019]. Стоит отметить, что осень как раз и относится к таким периодам, поэтому речь может идти об естественном фоне.

Улучшение ситуации с загрязнениями осени 2023 г. по отношению к осени 2022 г. связаны с увеличением водности рассматриваемого года. Средний сезонный моментальный расход по всем пунктам увеличился с 3,68 м³/с до 15,52 м³/с (321 %), а средний сезонный ИЗВ соответственно уменьшился с 11,49 до 5,53 (108 %), что привело к улучшению класса качества воды в бассейне с VII (чрезвычайно грязные) до V (грязные).

Резкому росту концентраций загрязняющих веществ теоретически способствуют расположенные вдоль русел рек города. На объекте исследования таких городов три: Черняховск, Озерск, Гусев. Также одним из потенциальных загрязнителей можно считать сельскохозяйственный сектор, но даже спустя 5 сезонов сложно увязать этот вид деятельности с загрязнениями. Этого нельзя сказать про природные циклы водной и береговой растительности, которая приводит к повышению концентрации биогенов, БПК₅ и несоответствию нормам ПДК по растворенному кислороду, в частности на участках суббассейнов, находящихся на территории парка Виштынецкий.

В качестве основных загрязнителей осенью 2023 г. выделены: нефтепродукты, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 1,40 до 22,80 (по 15 из 16 проб); железо, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 1,08 до 9,16 (по всем пробам); БПК₅, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 1,05 до 5,19 (по 11 из 16 проб); растворенный кислород, кратность превышения ПДК которых колеблется в диапазоне от 2,10 до 117,65 (по 9 из 16 проб). Другие загрязнители оказывают влияние на конкретные суббассейны или их участки и не так широко распространены этой осенью по всему бассейну. К ним относятся: аммоний, хлориды, фосфаты и ХПК. Влиянию этих элементов по большей части подвергся суббассейн реки Русской и пункт мониторинга П4 в р. Писсе. Значительно снизились загрязнения нитритами и аммонием, которые фиксировались в предыдущем году. Если отбросить сильный рост в пункте Р3, то среднее по бассейну снижение будет 89,1 % для нитритов и 85,9 % для аммония.

БЛАГОДАРНОСТИ

Картографирование и работа с ГИС выполнены в Институте географии РАН в рамках государственного задания № FMWS-2024-0007.

ACKNOWLEDGMENTS

Mapping and work with GIS were carried out at the Institute of Geography, Russian Academy of Sciences within the framework of state assignment No. FMWS-2024-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахмедова Н. Р., Великанов Н. Л., Наумов В. А.* Оценка качества воды малых водотоков Калининградской области. Вода: химия и экология, 2015. № 10. С. 19–24.
- Балдаков Н. А., Кудишин А. В.* Автоматизация расчета характеристик водосборного бассейна для решения задач моделирования поверхностного стока. Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. Т. 4. № 1. С. 83–89. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-83-89.
- Валл Е. В., Ахмедова Н. Р.* Эколого-гидрохимические исследования малых водотоков Калининградской области. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2021. Т. 7. № 4. С. 33–37.
- Глушченко А. И.* Экологическое состояние и качество подземных вод Калининградского скважинного водозабора. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки, 2008. № 1. С. 28.
- Джамалов Р. Г., Мироненко А. А., Мягкова К. Г., Решетняк О. С., Сафронова Т. И.* Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины. Водные ресурсы, 2019. Т. 46. № 2. С. 149–160. DOI: 10.31857/S0321-0596462149-160.
- Ермолаев О. П., Мальцев К. А., Мухарамова С. С., Хомяков П. В.* Картографическая модель бассейновых геосистем малых рек водосбора реки Лены. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки, 2018. Т. 160. № 1. С. 126–144.
- Зотов С. И., Спиринов Ю. А., Таран В. С., Королева Ю. В.* Гидрологические особенности и геоэкологическое состояние малых водотоков полейдерных территорий Калининградской области. Географический вестник, 2021. № 3(58). С. 92–106. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-3-92-106.
- Зотов С. И., Спиринов Ю. А.* Оценка геоэкологического состояния малых водотоков полейдерных земель: методический подход и картографическое обеспечение. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 597–613. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-597-613.
- Нагорнова Н. Н.* Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2012. С. 8–19.
- Нагорнова Н. Н., Берникова Т. А., Цупикова Н. А.* Гидрогеохимическая характеристика малых рек Калининградской области. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки, 2011. № 7. С. 160–166.
- Нагорнова Н. Н., Берникова Т. А., Цупикова Н. А.* Формирование гидрологических особенностей малых рек в физико-географических условиях Калининградской области на примере р. Прохладной. Вестн. РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности», 2014. № 4. С. 70–77.
- Наумов В. А.* Внутригодовое распределение стока рек Калининградской области в 2020 году. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2022. Т. 8. № 3. С. 35–44.
- Наумов В. А., Ахмедова Н. Р.* Инженерные изыскания в бассейне реки Преголи. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2017. 183 с.
- Спиринов Ю. А., Зотов С. И., Таран В. С., Королева Ю. В.* Оценка пространственных особенностей загрязнения рек Юго-Восточной части Калининградской области. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф., 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 186–200. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-186-200.

Спирин Ю. А. Анализ внутригодового распределения стока рек Славского района Калининградской области. Региональные геосистемы, 2020. Т. 44, № 2. С. 231–242. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-231-242.

Чумаченко А. Н., Хворостухин Д. П., Морозова В. А. Построение гидрологически-корректной цифровой модели рельефа (на примере Саратовской области). Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле, 2018. Т. 18. № 2. С. 104–109. DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial Modelling of Micro-pollutants in a Strongly Regulated Cross-border Lowland Catchment. Environmental Processes, 2021. V. 8. P. 973–992. DOI: 10.1007/s40710-021-00530-2.

Lata L. Catchment Delineation for Vjosa River WEAP Model, using QGIS Software. Journal of International Environmental Application and Science, 2020. V. 15 (4). P. 203–215.

Tang J. Y., Cao P. P., Xu C., Liu M. S. Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2013. V. 24 (1). P. 83–90.

Xiong H. Study on the release of carbon, nitrogen and phosphorus from the decomposition of aquatic plants. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 384. P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/384/1/012093.

REFERENCES

Akhmedova N. R., Velikanov N. L., Naumov V. A. Assessment of water quality in shallow watercourses in the Kaliningrad region. Water: Chemistry and Ecology, 2015. No. 10. P. 19–24 (in Russian).

Baldakov N. A., Kudishin A. V. Automatic calculation of the catchment solution for solving the problem of flow fraud modeling. Interexpo GEO-Siberia, 2019. V. 4. No. 1. P. 83–89 (in Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-83-89.

Chumachenko A. N., Khvorostukhin D. P., Morozova V. A. Building a hydrologically correct digital terrain model (on the territory of the Saratov region). Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2018. V. 18. No. 2. P. 104–109 (in Russian). DOI: 10.18500/1819-7663-2018-18-2-104-109.

Dzhamalov R. G., Mironenko A. A., Myagkova K. G., Reshetnyak O. S., Safronova T. I. Spatio-temporal analysis of the hydrochemical composition and pollution of water in the Northern Dvina basin. Water Resources, 2019. V. 46. No. 2. P. 149–160 (in Russian). DOI: 10.31857/S0321-0596462149-160.

Ermolaev O. P., Maltsev K. A., Mukharamova S. S., Khomyakov P. V. Cartographic model of basin geosystems of small rivers in the catchment area of the Lena River. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series), 2018. V. 160. No. 1. P. 126–144 (in Russian).

Glushchenko A. I. Ecological state and quality of underground waters of the Kaliningrad borehole water intake. Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University Series: Natural and medical sciences, 2008. No. 1. P. 28 (in Russian).

Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial Modelling of Micro-pollutants in a Strongly Regulated Cross-border Lowland Catchment. Environmental Processes, 2021. V. 8. P. 973–992. DOI: 10.1007/s40710-021-00530-2.

Lata L. Catchment Delineation for Vjosa River WEAP Model, using QGIS Software. Journal of International Environmental Application and Science, 2020. V. 15 (4). P. 203–215.

- Nagornova N. N.* Geoecological assessment of the state of shallow watercourses in the Kaliningrad region: dis. ... PhD in Geography. Kaliningrad, 2012. P. 8–19 (in Russian).
- Nagornova N. N., Bernikova T. A., Tsupikova N. A.* Formation of hydrological features of small rivers in the physical and geographical conditions of the Kaliningrad region on the territory of the Prokhladnaya River. RUDN Journal of Ecology and Life Safety, 2014. No. 4. P. 70–77 (in Russian).
- Nagornova N. N., Bernikova T. A., Tsupikova N. A.* Hydrogeochemical characteristics of macro-rivers of the Kaliningrad region. Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and medical sciences, 2011. No. 7. P. 160–166 (in Russian).
- Naumov V. A.* Intra-annual accumulation of river runoff in the Kaliningrad region in 2020. Journal of Science and Education of the North-West of Russia, 2022. V. 8. No. 3. P. 35–44 (in Russian).
- Naumov V. A., Akhmedova N. R.* Engineering surveys in the Pregolya River basin. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University, 2017. P. 112–122 (in Russian).
- Spirin Yu. A., Zotov S. I., Taran V. S., Koroleva Yu. V.* Assessment of spatial features of river pollution in the South-Eastern part of the Kaliningrad region. InterCarto. InterGIS, 2023. V. 29. Part 1. P. 186–200. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-186-200 (in Russian).
- Spirin Yu. A.* Analysis of the intra-annual distribution of river flow in the Slavsky district of the Kaliningrad region. Regional Geosystems, 2020. V. 44. No. 2. P. 231–242 (in Russian). DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-231-242.
- Tang J. Y., Cao P. P., Xu C., Liu M. S.* Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao, 2013. V. 24 (1). P. 83–90.
- Xiong H.* Study on the release of carbon, nitrogen and phosphorus from the decomposition of aquatic plants. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. V. 384. P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/384/1/012093.
- Wall E. V., Akhmedova N. R.* Ecological and hydrochemical studies of small watercourses in the Kaliningrad region. Journal of Science and Education of the North-West of Russia, 2021. V. 7. No. 4. P. 33–37 (in Russian).
- Zotov S. I., Spirin Yu. A., Taran V. S., Koroleva Yu. V.* Hydrological features and geoecological state of shallow watercourses of polder observations in the Kaliningrad Region. Geographic Bulletin, 2021. No. 3(58). P. 92–106 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2021-3-92-106.
- Zotov S. V., Spirin Yu. A.* Assessment of the geoecological state of shallow watercourses in polder lands: a methodological approach and cartographic support. InterCarto. InterGIS, 2022. V. 28. Part 2. P. 597–613 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-597-613.
-