

Ю.А. Спирин¹, С.И. Зотов², В.С. Таран³, Ю.В. Королева⁴

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕК ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

АННОТАЦИЯ

Реки юго-восточной части Калининградской области: Анграпа, Писса, Красная, Русская обладают большой уязвимостью к природным и антропогенным воздействиям, имеют первую и высшую категорию рыбохозяйственного назначения, отличаются трансграничным статусом. Мониторинг экологического состояния водотоков фрагментарен и не отвечает современным требованиям. В связи с отмеченными особенностями они представляют большой интерес для исследований. Для каждого водотока определены 4 точки от верховья до устья, в которых в осенний гидрологический сезон 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, кратности превышения ПДК по растворенному кислороду, биологическому потреблению кислорода за 5 суток (БПК₅), нитритам, аммонии, железу, нефтепродуктам. Результаты исследования показали, что качество воды в изучаемых реках находится в неудовлетворительном состоянии. Выявленное пространственное загрязнение складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается. Основным показателем, который вносит свой вклад в загрязнение водотоков, являются нефтепродукты, что подчеркивает потенциальное антропогенное влияние (кратность превышения ПДК колеблется в широком диапазоне — от 2,80 до 124,60 (по всем пробам)). Резкие изменения по этому показателю происходят после прохождения водотоками крупных по меркам района исследования городов. На втором месте находится показатель железа, вносящий серьезный вклад в общую картину загрязнения (кратности превышения по железу — от 1,94 до 48,49 (по всем пробам)), что обусловлено высокими концентрациями этого ингредиента в подземных водах, питающих реки. Биогенные загрязнения, представленные аммонием и нитритами, распределены равномерно, что, предположительно, связано с их сельскохозяйственным происхождением (от 1,12 до 11,28 кратности по аммонии [по 5 из 16 пробам] и от 1,38 до 7,38 по нитриту [по 7 из 16 пробам]).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антропогенные воздействия, гидрологический сезон, гидрохимический анализ, качество вод, картографирование загрязнения рек

¹ Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, кафедра метеорологии и климатологии, ул. Прянишникова, д. 12, Москва, Россия, 127550, 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: yu.koroleff@yandex.ru

Yuri A. Spirin¹, Sergey I. Zotov², Veronika S. Taran³, Yulia V. Koroleva⁴

EVALUATION OF SPATIAL FEATURES OF POLLUTION OF RIVERS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE KALININGRAD REGION

ABSTRACT

The rivers of the south-eastern part of the Kaliningrad region: Angrapa, Pissa, Krasnaya, Russkaya are highly vulnerable to natural and anthropogenic impacts, have the first and highest category of fishery purposes, and are distinguished by their transboundary status. Monitoring of the ecological state of watercourses is fragmentary and does not meet modern requirements. In connection with the noted features, they are of great interest for research. For each watercourse, 4 points were identified from the headwaters to the mouth, in which hydrological parameters were measured in the autumn hydrological season and water samples were taken for chemical analysis. The multiplicity of exceeding the MPC for a large list of chemical elements was calculated, the WPI and the corresponding class of water quality in the studied rivers were determined. Mapping was carried out and spatial differentiation of the WPI, the multiplicity of exceeding the MPC for dissolved oxygen, BOD₅, nitrites, ammonium, iron, oil products was revealed. The results of the study showed that the water quality in the studied rivers is in an unsatisfactory state. The identified spatial pollution is formed in the traditional way — the quality of water from the source to the mouth is deteriorating. The main indicator that contributes to the pollution of watercourses is oil products, which emphasizes the potential anthropogenic impact (the multiplicity of exceeding the MPC varies in a wide range — from 2.80 to 124.60 (for all samples)). Sharp changes in this indicator occur after watercourses pass through large cities by the standards of the study area. In second place is the iron index, which makes a serious contribution to the overall picture of pollution (excess ratios for iron — from 1.94 to 48.49 (for all samples)), which is due to the high concentrations of this ingredient in the groundwater that feeds the rivers. Biogenic pollutants represented by ammonium and nitrite are evenly distributed, which is presumably due to their agricultural origin (from 1.12 to 11.28 times for ammonium [for 5 out of 16 samples] and from 1.38 to 7.38 for nitrite [for 7 out of 16 samples]).

KEYWORDS: anthropogenic impacts, hydrological season, hydrochemical analysis, water quality, river damage mapping

ВВЕДЕНИЕ

Калининградская область — это один из уникальных субъектов в Российской Федерации. Речная сеть здесь имеет особую значимость, поскольку именно за счет нее покрывается большая часть спроса на водные ресурсы в регионе. Рост индустриализации и урбанизации наложил свой отпечаток на современное экологическое состояние водотоков в Калининградской области [Нагорнова и др., 2011; 2014; Нагорнова, 2012; Ахмедова и др.,

¹ Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Department of Meteorology and Climatology, 12, Pryanishnikova str., Moscow, 127550, 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: yu.koroleff@yandex.ru

2015; Зотов и др., 2021; Зотов, Спирун, 2022]. Современное состояние водных объектов на рассматриваемой территории по большей части оценивается как загрязненное¹.

Для принятия решений в формировании стратегии водоохраных и водозащитных мероприятий нужно иметь массивы гидрохимических данных по водным объектам, что часто является дефицитной информацией. Сезонный мониторинг за гидрохимическими показателями водотоков — наиболее эффективный инструмент при анализе экологической обстановки на водосборах.

Объектом нашего исследования выбраны реки Юго-Восточной части Калининградской области, относящиеся к бассейну р. Анграпы. Это рр. Писса, Красная, Русская и непосредственно сама р. Анграпа (рис. 1). На представленных водотоках мониторинг загрязнения вод ведется фрагментарно, сезонный мониторинг отсутствует. Цель работы — собрать необходимую гидрохимическую информацию по водотокам в бассейне р. Анграпы, построить и проанализировать картосхемы уровней химического загрязнения.

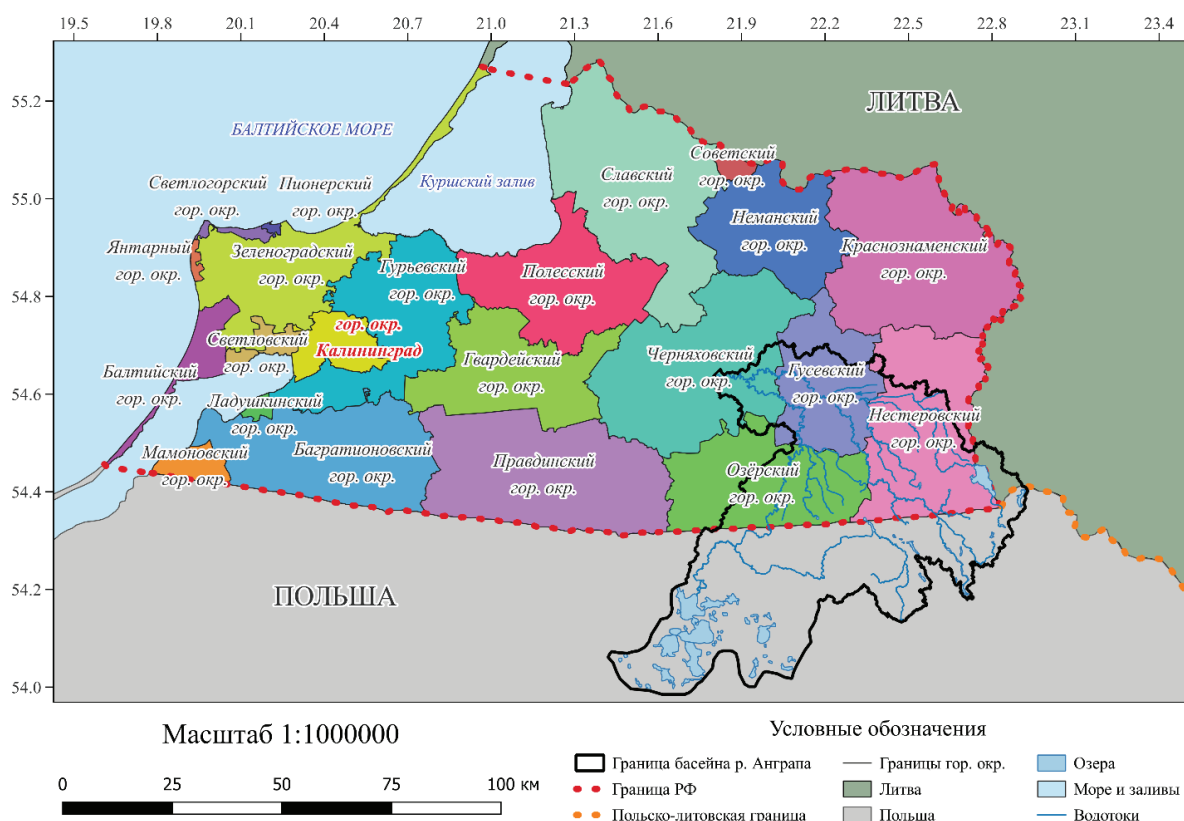


Рис. 1. Картосхема водосборного бассейна р. Анграпы относительно РФ (Калининградской области и ее муниципалитетов), Литвы и Польши
Fig. 2. Map of the drainage basin of the Angrapa River regarding Russian Federation (Kaliningrad Region and its municipalities), Lithuania and Poland

Исучаемые водотоки бассейна р. Анграпе имеют ряд географических особенностей, представляющих интерес для исследования:

- 1) Наблюдается большой перепад высот по всей изучаемой территории (от 0 м до 287 м БС), который является следствием того, что одна половина бассейна р. Анграпы

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

располагается на низменности, а вторая половина на возвышенности. В границах исследуемого бассейна расположен крупный лесной массив, имеющий статус особо охраняемой природной территории — природный парк «Виштинецкий». Изучаемые водотоки имеют первую и высшую категорию рыбохозяйственного назначения и обладают большой уязвимостью к природным и антропогенным воздействиям.

- 2) Бассейн р. Анграпы располагается на территории 3 стран: Российская Федерация, Польша, Литва. Реки Анграпа и Красная являются трансграничными, истоки и верховья их расположены на территории Польши и в намного меньшей части Литвы, со всеми потенциальными рисками дополнительного загрязнения с ее стороны.
- 3) Бассейн р. Анграпы расположен на территории 4 муниципалитетов Калининградской области (Гусевский, Нестеровский, Черняховский и Озерский городские округа), которые ведут активную хозяйственную деятельность. Основным можно считать сельское хозяйство и сопряженные с ним сектора: животноводство, растениеводство, овощеводство, пищевое производство и промышленность, нацеленная на переработку сельскохозяйственной продукции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор водотоков для гидрохимического анализа осуществлялся таким образом, чтобы дать точную сравнительную картину пространственной динамики содержания загрязняющих веществ. Построение такого пространственного распределения загрязнений в полной мере позволит проводить идентификацию влияния на гидрохимические показатели природных и антропогенных факторов на разных участках водосборного бассейна. Природно-хозяйственные особенности¹ с большой вероятностью свидетельствуют о том, что поступление загрязняющих веществ в реки носит диффузный характер. Вследствие этого принято решение определить по 4 точки для измерения гидрологических параметров и отбора проб воды для химических анализов в следующих природно-антропогенных ландшафтах: верховье на территории РФ (1), граница лесных и сельскохозяйственных угодий (2), граница сельскохозяйственных угодий и крупных населенных пунктов (3), устья водотоков (4). Выбранные реки и точки отбора проб представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Выезд для исследования водотоков в осеннем гидрологическом сезоне осуществлен 15.10.2022. В процессе выезда измерены скорость течения и средняя глубина рек, в полевых условиях определены цветность, запах, мутность (ЕМФ — единицы мутности по формазину), температура, кислотный остаток воды и отобраны пробы воды для последующих химических анализов. Химические анализы проб проводились в лаборатории высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта на перечень важнейших показателей. *Органолептические показатели* определены в соответствии с ГОСТ Р 57164-2016, *взвешенные вещества* — в соответствии с РД 52.24.468-2019, *химическое потребление кислорода (ХПК)* — ПНД Ф 14.1:2:4. 190-2003, *биологическому потреблению кислорода за 5 суток (БПК₅)* — ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97, *нитраты* — ПНД Ф 14.1:2.4-95, *нитриты* — ПНД Ф 14.1:2:4.3-95, *аммоний и аммонийный азот* — ПНД Ф 14.1:2.1-95, *фосфаты* — ПНД Ф 14.1:2.1-95, *сухой остаток* — ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010, *хлориды* — ГОСТ 4245-72, *сульфаты* — ПНД Ф 14.1:2.159-2000, *натрий, магний, калий, кальций* — ПНД Ф 14.1:2.159-2000, *железо* — ПНД Ф 14.1:2.159-2000, *нефтепродукты* — ПНД Ф 14.1:2.116-97. Химические анализы проведены с помощью прибора двухлучевой спектрофотометрии UV-1800 Shimadzu и системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-105М».

¹ Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2021 г.». Калининград: ВИА Калининград, 2022. С. 6–80.

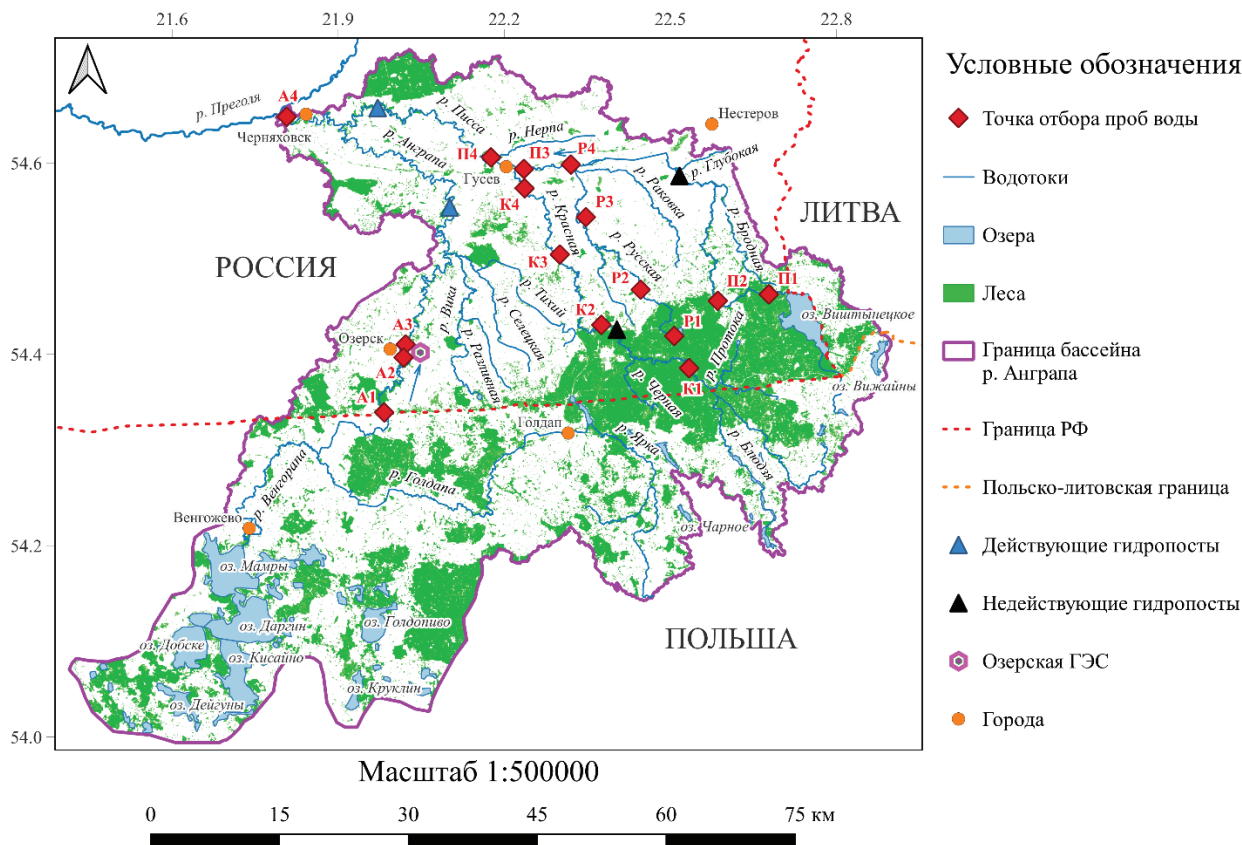


Рис. 2. Картограмма расположения исследуемых водотоков и локация точек отбора проб воды
Fig. 2. Map of the location of the researched watercourses and the location of water sampling points

Табл. 1. Выбранные реки и локация точек проб воды
Table 1. Selected rivers and location of water sampling points

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

На основе полученных показателей рассчитаны кратности превышения предельной допустимой концентрации (ПДК), индекса загрязнения воды (ИЗВ) и соответствующий ему класс качества воды (табл. 2) в исследуемых реках. Расчет ИЗВ проводился по формуле для поверхностных вод суши:

$$ИЗВ = \left(\sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{ПДК_i} \right) / 6 \quad (1),$$

где C_i — наибольшие относительно ПДК концентрация i -го загрязняющего вещества в воде с обязательным учетом растворенного кислорода и БПК₅;
ПДК — предельно допустимая концентрация i -го загрязняющего вещества.

Табл. 2. Классы качества воды в зависимости от значения индекса загрязнения воды¹
 Table 2. Water quality classes depending on the value of the water pollution index

Классификация	Значения ИЗВ	Классы качества воды
Очень чистые	менее или равно 0,2	I
Чистые	более 0,21–1,0	II
Умеренно загрязненные	1,1–2,0	III
Загрязненные	2,1–4,0	IV
Грязные	4,1–6,0	V
Очень грязные	6,1–10,0	VI
Чрезвычайно грязные	>10,1	VII

В работе использовались совмещенные списки ПДК загрязняющих веществ: ПДК₁² и ПДК₂³ (табл. 3). Расчеты проводятся исходя из самого строгого показателя в представленном списке.

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 и др., 2019; Lata, 2020].

При помощи ландшафтно-бассейнового подхода были построены схемы пространственной дифференциации ИЗВ и основных загрязняющих веществ [Нагорнова, 2012; Джамалов и др., 2019; Lämmchen et al., 2021; Зотов, Спиринов, 2022]. Бассейн р. Анграпы был разделен на 4 суббассейна, а они в свою очередь поделены на 4 участка, что соответствует количеству выбранных точек отбора проб воды. При формировании границ участков соблюдалась та же логика, что при выборе точек мониторинга. Стоит учесть, что в этом процессе более важна четкая визуализация распространения загрязнений в пространстве и выявление потенциального вектора возможных закономерностей относительно антропогенных и природных факторов для дальнейшего анализа сложившейся ситуации в бассейне, нежели высокая точность.

¹ 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.

² «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 г.)». Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения 29.03.20).

³ 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 29.03.20).

Табл. 3. Совмещенный список ПДК
Table 3. Combined list of MPCs

Наименование показателя	ПДК ₁	ПДК ₂	Наименование показателя	ПДК ₁	ПДК ₂
Цветность, градусы	–	20	Аммоний, мг/л	0,5	1,5
Запах, баллы	–	2	Фосфаты, мг/л	0,05	3,5
Мутность, ЕМФ	–	2	Хлориды, мг/л	300	350
Температура воды, °С	–	–	Сульфаты, мг/л	100	500
рН, ед	фон	6–9	Натрий, мг/л	120	200
Взвеш. вещества, мг/л	–	–	Магний, мг/л	40	–
Растворенный О ₂ , мг/л	≥ 6	–	Железо общее, мг/л	0,1	0,3
ХПК, мг/л	–	15	Нефтепродукты, мг/л	0,05	0,1
БПК ₅ , мг/л	2,1	–	Соленость, мг/л	–	–
Нитраты, мг/л	40	45	Калий, мг/л	50	–
Нитриты, мг/л	0,08	3	Кальций, мг/л	180	–

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во время полевого выезда, проведенного в середине осеннего гидрологического сезона, отмечен низкий уровень воды в реках, что типично для Калининградской области и подтверждается исследованиями водного режима водотоков региона [Наумов, Ахмедова, 2017; Наумов, 2020]. Режим межени рек обусловлен небольшим количеством атмосферных осадков, выпавших в летний и ранний осенний сезоны. Эту особенность нужно учитывать при анализе массового содержания загрязняющих веществ, поскольку концентрация их в водоеме получается выше. В день отбора проб температура атмосферного воздуха в среднем составляла 14 °С, давление 761 мм рт. ст., ветер юго-западный, влажность воздуха 85 %, ясно и без осадков. Русла рек в устьевой части преимущественно землянистые, в истоковой части — илистые. Глубина в основной части отбора проб небольшая (в среднем в интервале 58–80 см), связана с продолжающимся периодом летней межени. По точке отбора проб «Р1» нет химических данных, поскольку вода в данном водотоке отсутствовала, и невозможно было осуществить отбор проб воды. Результаты полевых и лабораторных химических анализов представлены в таблице 4, точки маркированы в соответствии с картосхемой на рисунке 2.

На основании полученных данных рассчитаны кратность превышения ПДК, ИЗВ и определен класс качества воды в исследуемых водотоках. Результаты сведены в единую табл. 5; отдельно выделены полужирным шрифтом те загрязняющие вещества, которые легли в основу расчета ИЗВ. Построена пространственная дифференциация ИЗВ в бассейне р. Анграпы (рис. 3.).

Как можно видеть из таблицы 5 и рисунка 3, исследуемый водосбор подвержен серьезным загрязнениям, класс качества воды варьируется от «загрязненной» до «чрезвычайно грязной». Фиксируется классическая картина загрязнения водотоков от истока к устью, где урбанизация вместе с сельскохозяйственными землями выступают основными потенциальными источниками загрязнения, т. к. именно после пересечения зон их расположения качество воды ухудшается. Проанализируем ситуацию в каждом из суббассейнов.

Табл. 4. Гидрохимические показатели водотоков водосборного бассейна р. Анграпы
Table 4. Hydrochemical indicators of watercourses in the catchment area of the river Angrapa

Водотоки	р. Анграпа				р. Писса				р. Русская				р. Красная			
	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	P1	P2	P3	P4	K1	K2	K3	K4
Точки отбора	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	P1	P2	P3	P4	K1	K2	K3	K4
Цветность, градусы	10	10	20	10	15	5	25	20	–	35	30	20	10	10	5	10
Запах, баллы	1	2	0	0	0	0	3	2	–	2	2	2	1	0	0	0
Мутность, мг/л	15	10	15	10	15	4	16	18	–	19	15	20	15	5	6	10
t воды, °С	9,6	12,2	12,0	12,7	12,1	13,6	12,2	11,5	–	13,6	13,5	13,4	9,0	11,9	11,5	11,8
pH, ед	7,9	7,0	7,2	7,1	7,9	7,3	7,6	7,3	–	8,1	7,8	7,2	8,0	8,0	8,1	7,8
Взвеш. вещ., мг/л	1,95	1,40	18,67	1,91	1,12	15,34	11,12	15,77	–	29,35	5,73	4,95	12,05	13,17	10,85	13,82
Раств. О ₂ , мг/л	7,57	6,91	6,54	7,05	7,31	7,56	6,88	7,47	–	2,44	3,51	3,02	7,52	6,98	6,81	8,09
ХПК, мг/л	8,51	13,66	13,20	11,25	5,74	13,38	11,15	9,32	–	13,20	39,16	18,75	6,32	8,37	5,13	18,83
БПК ₅ , мг/л	6,85	6,90	6,68	5,74	10,14	12,27	5,69	4,81	–	6,68	19,14	9,34	3,83	4,36	2,80	9,37
Нитраты, мг/л	0,328	0,258	0,754	1,442	0,814	0,998	0,771	0,762	–	0,731	0,572	0,489	0,415	0,418	1,568	0,451
Нитриты, мг/л	0,59	0,12	0,12	0,03	0,01	0,43	0,15	0,14	–	0,01	0,01	0,01	0,11	0,01	0,01	0,32
Аммоний, мг/л	0,56	1,61	1,16	1,12	1,16	1,09	1,44	1,40	–	5,64	3,36	3,30	1,06	0,24	0,76	1,38
Фосфаты, мг/л	0,017	0,067	0,077	0,012	0,027	0,032	0,092	0,081	–	0,058	0,080	0,079	0,012	0,252	0,068	0,109
Сухой остаток, мг/л	0,35	2,55	0,23	0,45	0,13	2,45	0,58	0,95	–	6,63	3,41	8,15	0,57	0,45	1,32	0,63
Хлориды, мг/л	96,61	64,37	71,65	213,4	67,05	65,02	57,81	56,07	–	224,15	21,90	74,68	69,61	53,02	90,01	60,11
Сульфаты, мг/л	121,1	99,7	104,2	185,5	127,1	141,2	80,1	76,1	–	69,2	16,37	117,3	84,5	126,0	130,1	113,1
Натрий, мг/л	6,37	5,67	9,18	7,51	2,66	3,09	5,17	6,34	–	16,77	9,72	38,66	4,40	5,45	4,13	5,59
Магний, мг/л	8,21	7,59	9,44	6,42	5,41	5,72	6,73	8,40	–	11,72	14,84	17,28	8,41	9,03	7,91	10,33
Железо, мг/л	0,214	0,194	0,797	0,734	0,312	0,872	0,729	0,836	–	3,572	4,849	2,879	0,996	0,745	0,849	0,815
Нефтепродукты, мг/л	0,31	0,64	1,25	3,65	0,18	0,14	6,23	3,71	–	2,15	3,31	5,59	0,14	0,65	0,18	0,85
Соленость, мг/л	0,40	0,42	0,43	0,44	0,25	0,26	0,31	0,38	–	0,72	0,79	0,85	0,41	0,44	0,44	0,42
Калий, мг/л	2,86	2,55	3,10	2,94	1,97	1,36	2,28	4,26	–	5,91	1,91	8,67	1,10	2,02	5,16	1,99
Кальций, мг/л	45,73	41,12	50,57	33,47	27,80	30,32	35,80	49,09	–	60,97	112,90	86,65	51,5	44,96	48,37	61,67

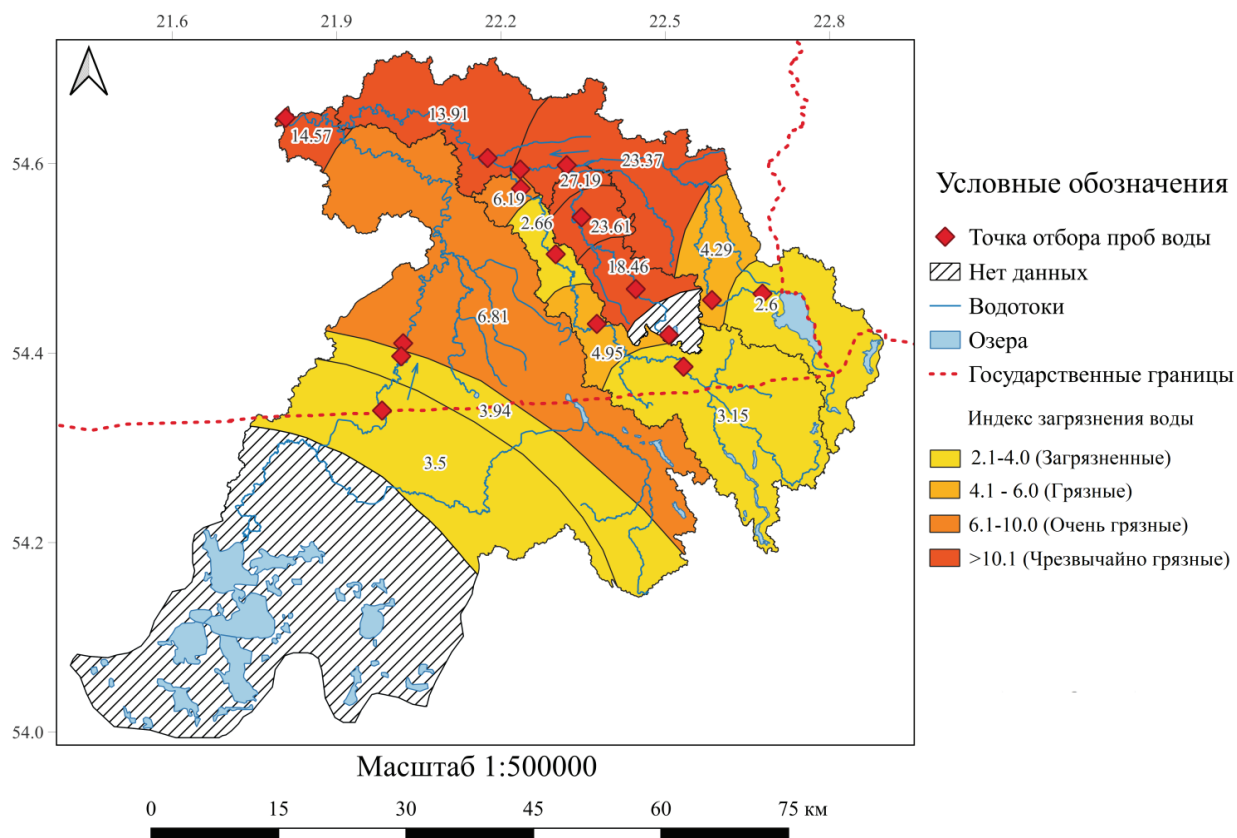


Рис. 3. Пространственная дифференциация ИЗВ в бассейне р. Анграпы
Fig. 3. Spatial differentiation of the WPI in the basin of the Angrapa River

В суббассейне р. Анграпы средний показатель ИЗВ равен 7.21, что соответствует классу качества воды «очень грязная». На приграничном участке в точке А1 ИЗВ равняется 3.50, а при переходе участка из точки А1 в точку А2, наблюдается незначительно ухудшение качества воды, ИЗВ увеличилось с 3.50 до 3.94. При переходе из точки А2 в точку А3 произошло более закономерное и весомое увеличение ИЗВ, т. к. точка А2 расположена перед вхождением водотока в г. Озерск, а точка А3 уже после выхода из его границ. Это привело к увеличению ИЗВ с 3.94 до 6.81. Та же история с переходом зоны в точке А3 в зону точки А4, только вместо г. Озерск, там расположен более крупный г. Черняховск, что привело к росту ИЗВ с 6.81 до 14.57.

В суббассейне р. Красной средний показатель ИЗВ равен 4.24, что соответствует классу качества воды «грязная». Здесь загрязнение распределено в своеобразном шахматном порядке, а основным триггером к увеличению ИЗВ стали высокие концентрации нефтепродуктов, а в точке К2 — еще и фосфатов. Точки К1 и К3 имеют сравнительно низкие показатели ИЗВ — 3.15 и 2.66, в это же время в точках К2 и К4 более высокие показатели — 4.95 и 6.19. Если причину роста в зоне отбора проб в точке К4 можно объяснить наличием рядом г. Гусева, то причину такого роста в точке К2 выяснить на данном этапе исследования не удалось, особенно с учетом того, что в следующей точке К3 загрязнение снизилось почти в 2 р. Также не совсем понятно, почему в точке К1, где расположено верховье водотока и крупный лесной массив, качество воды чуть хуже, чем в точке К3, которая находится в менее благоприятных условиях (после загрязненной зоны в точке К2). Несмотря на это, р. Красная — самая чистая из исследуемых рек, потому что в ее бассейне нет явных источников загрязнения и воздействует благоприятный природный фактор в виде лесного массива в верховье реки.

Табл. 5. Кратность превышения ПДК, ИЗВ и класс качества воды в исследуемых водотоках
Table 5. Multiplicity of exceeding MPC, WPI and water quality class in the studied watercourses

Водотоки	р. Анграпа				р. Писса				р. Русская				р. Красная			
	A1	A2	A3	A4	П1	П2	П3	П4	P1	P2	P3	P4	K1	K2	K3	K4
Точки отбора																
рН, ед	0,99	0,88	0,90	0,89	0,99	0,91	0,95	0,91	–	1,01	0,98	0,90	1,00	1,00	1,01	0,98
Раств. О ₂ , мг/л	0,79	0,87	0,92	0,85	0,82	0,79	0,87	0,80	–	16,39	8,55	9,93	0,80	0,86	0,88	0,74
ХПК, мг/л	0,57	0,91	0,88	0,75	0,38	0,89	0,74	0,62	–	0,88	2,61	1,25	0,42	0,56	0,34	1,26
БПК ₅ , мг/л	3,26	3,29	3,18	2,73	4,83	5,84	2,71	2,29	–	3,18	9,11	4,45	1,82	2,08	1,33	4,46
Нитраты, мг/л	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	–	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01
Нитриты, мг/л	7,38	1,50	1,50	0,38	0,13	5,38	1,88	1,75	–	0,13	0,13	0,13	1,38	0,13	0,13	4,00
Аммоний, мг/л	1,12	3,22	2,32	2,24	2,32	2,18	2,88	2,80	–	11,28	6,72	6,60	2,12	0,48	1,52	2,76
Фосфаты, мг/л	0,34	1,34	1,54	0,24	0,54	0,64	1,84	1,62	–	1,16	1,60	1,58	0,24	5,04	1,36	2,18
Хлориды, мг/л	0,32	0,21	0,24	0,71	0,22	0,22	0,19	0,19	–	0,75	0,07	0,25	0,23	0,18	0,30	0,20
Сульфаты, мг/л	1,21	1,00	1,04	1,86	1,27	1,41	0,80	0,76	–	0,69	0,16	1,17	0,85	1,26	1,30	1,13
Натрий, мг/л	0,05	0,05	0,08	0,06	0,02	0,03	0,04	0,05	–	0,14	0,08	0,32	0,04	0,05	0,03	0,05
Магний, мг/л	0,21	0,19	0,24	0,16	0,14	0,14	0,17	0,21	–	0,29	0,37	0,43	0,21	0,23	0,20	0,26
Железо, мг/л	2,14	1,94	7,97	7,34	3,12	8,72	7,29	8,36	–	35,72	48,49	28,79	9,96	7,45	8,49	8,15
Нефтепродукты, мг/л	6,20	12,80	25,00	73,00	3,60	2,80	124,60	74,20	–	43,00	66,20	111,80	2,80	13,00	3,60	17,00
Калий, мг/л	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,05	0,09	–	0,12	0,04	0,17	0,02	0,04	0,10	0,04
Кальций, мг/л	0,25	0,23	0,28	0,19	0,15	0,17	0,20	0,27	–	0,34	0,63	0,48	0,29	0,25	0,27	0,34
ИЗВ	3,50	3,94	6,81	14,67	2,66	4,29	23,37	13,91	–	18,46	23,61	27,19	3,15	4,95	2,86	6,19
Класс качества воды	IV	IV	VI	VII	IV	V	VII	VII		VII	VII	VII	IV	V	IV	VI

В суббассейне р. Русской средний показатель ИЗВ равен 23.09, что соответствует классу качества воды «очень грязная». Здесь наблюдается равномерное снижение качества воды от точки Р2 (ИЗВ = 18.46) до точки Р4 (ИЗВ = 27.19). В связи с этим складывается интересная ситуация по отношению к р. Красной. Обе реки расположены в небольшой удаленности друг от друга, протекают в благоприятной зоне, с низким уровнем урбанизации, промышленности и сельского хозяйства, берут свое начало из крупного лесного массива (что, как показывает практика, позитивным образом влияет на качество воды), имеют схожие гидрологические характеристики. При этом р. Красная демонстрирует наименьшую загрязненность из рассмотренных водотоков, в то время как р. Русская, напротив, наибольшую. Исследования, которые будут проведены в следующие гидрологические сезоны, вероятно, позволят ответить на этот вопрос.

В суббассейне р. Писсы средний показатель ИЗВ равен 11.04, что соответствует классу качества воды «очень грязная». Точка П1 расположена в верховье реки, внутри лесного массива около о. Виштынецкое. Такие условия должным образом отразились на качестве воды в реке — ИЗВ составило 2.60, что является наилучшим показателем из всех 16 точек. При выходе из лесного массива, в зоне точки П2, ИЗВ увеличилось до 4.29. Перед входом реки в г. Гусев (точка П3) качество воды значительно ухудшилось, что можно объяснить тем, что в этой локации впадает р. Русская, имеющая схожий расход и очень высокий уровень загрязнения. После прохождения городской черты (точка П4) качество воды улучшилось почти в 2 р., это можно связать с тем, что на этой территории впадает р. Красная, которая, как и р. Русская, имеет схожий с р. Писса расход воды, но в отличие от нее — более высокое качество воды. Это послужило тому, что качество воды в р. Писса до города хуже, чем после него. Такие выводы позволяет сделать то, что К4 и Р4 расположены в местах впадения соответствующих данным маркировкам рек в р. Писса, а П3 и П4 расположены рядом с ними.

С целью детализации ситуации с загрязнениями была построена дифференциация по 6 основным показателям, которые легли в основу почти каждого расчета индекса загрязнения воды. Для этого построим картосхемы пространственного распределения кратности превышения ПДК по ним (рис. 4).

Основным показателем, который вносит свой вклад в загрязнение водотоков, являются нефтепродукты, что подчеркивает потенциальное антропогенное влияние. Резкие изменения по этому показателю происходят после прохождения водотоками крупных по меркам района исследования городов.

На втором месте находится показатель железа, вносящий серьезный вклад в общую картину загрязнения, что обусловлено высокими концентрациями этого ингредиента в подземных водах, питающих реки [Глуценко, 2008; Валл, Ахмедова, 2021]. Это наблюдается и на рис. 4, где подобное распределение загрязнения можно сопоставить с рельефом — чем ниже отметка, тем больше концентрация железа, т. к. выше влияние обогащенных железом грунтовых вод в питании реки. Но над этим предположением стоит более детально поработать в следующих исследованиях.

Биогенные загрязнения, представленные аммонием и нитритами, распределены равномерно, что предположительно связано с их сельскохозяйственным происхождением. Зачастую источником такого рода загрязнения в регионе выступают вносимые на пахотных землях азотные удобрения или их остатки [Зотов, Спиринов, 2022]. Сельскохозяйственные угодья в равной степени распространены по всей площади водосбора. Превышения БПК₅ и растворенного кислорода также имеют равномерный неярко выраженный характер. Исключением может считаться только р. Русская, где скорее всего из-за общей загрязненности эти показатели хуже, чем у других исследуемых рек.

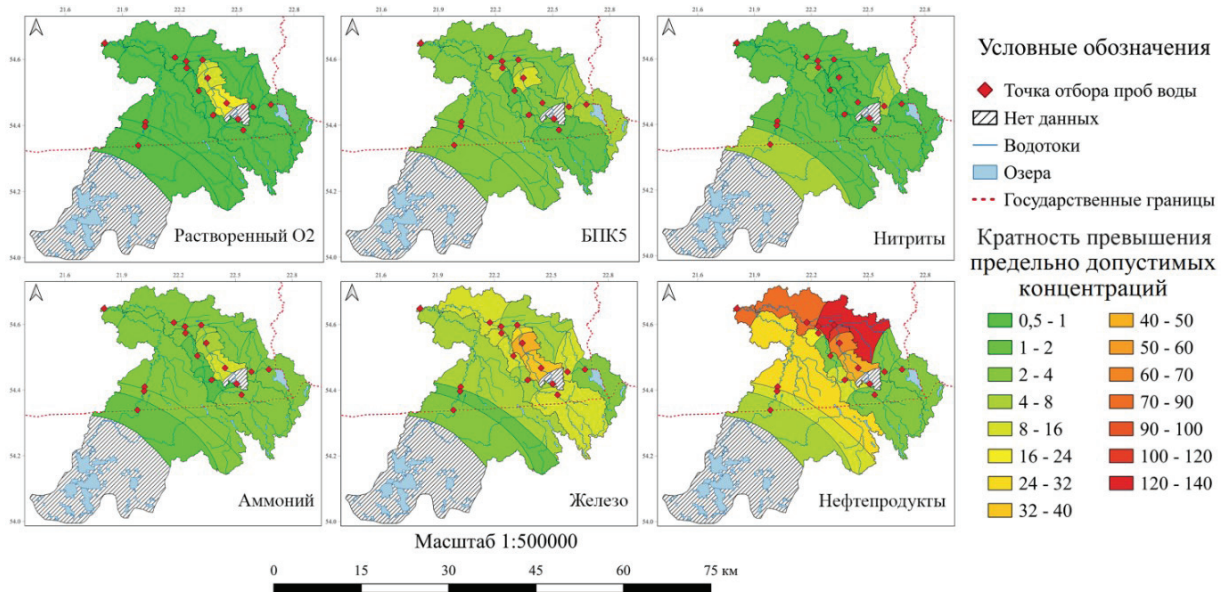


Рис. 4. Картограммы пространственного распределения кратности превышения ПДК в бассейне р. Анграпы по растворенному кислороду, БПК₅, нитритам, аммонии, железу, нефтепродуктам

Fig. 4. Maps of the spatial distribution of the multiplicity of exceeding the MPC in the basin of the Angrapa River for dissolved oxygen, BOD₅, nitrites, ammonium, iron, oil products

ВЫВОДЫ

Качество воды в изучаемых реках находится в неудовлетворительном состоянии, несмотря на благоприятные природные условия и местами низкую антропогенную нагрузку присутствующую на большей его части. По точкам отбора проб класс качества воды характеризуется следующим образом: загрязненные (А1–А2–П1–К1–К2), грязные (П2–К2); очень грязные (К3–К4); чрезвычайно грязные (А4–П3–П4–Р2–Р3–Р4). Общая картина загрязнения (за исключением некоторых нюансов) складывается традиционным образом — качество воды от истока к устью ухудшается.

Резкому росту концентраций загрязняющих веществ теоретически способствуют расположенные вдоль русла рек города. На объекте исследования таких городов три: Черняховск, Озерск, Гусев. Также одним из потенциальных загрязнителей можно считать сельскохозяйственный сектор. Но поскольку сельское хозяйство имеет циклический характер, более детально загрязнение от него можно будет разобрать в весенний и летний гидрологические сезоны. Необходимо упомянуть и о грунтовых водах, сильно влияющих на уровень железа в водотоках.

В качестве основного загрязнителя можно выделить нефтепродукты, кратность превышения ПДК которых колеблется в широком диапазоне — от 2.80 до 124.60 (по всем пробам). Отмечаемые кратности превышения по железу — от 1.94 до 48.49 (по всем пробам). Зафиксированы кратности превышения по биогенным элементам. Превышения концентраций аммония и нитритов хоть и на порядок ниже, чем у нефтепродуктов и железа, но все же остаются достаточно высокими: от 1.12 до 11.28 кратности по аммонии (по 5 из 16 пробам) и от 1.38 до 7.38 по нитриту (по 7 из 16 пробам). Зафиксировано 5-кратное превышение по фосфатам в точке К2.

Проведенное исследование можно считать первым из запланированного авторским коллективом цикла, приуроченного к оценке геоэкологического состояния водотоков Юго-

Восточной части Калининградской области в рамках написания кандидатской диссертации Таран В.С. Исследования рек в последующие гидрологические сезоны позволят выявить уже пространственно-временную динамику загрязнений и более точно определить их причины.

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.

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.

Глуценко А.И. Экологическое состояние и качество подземных вод Калининградского скважинного водозабора. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки, 2008. № 1. 28 с.

Джамалов Р.Г., Мироненко А.А., Мягкова К.Г., Решетняк О.С. и др. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины. Водные ресурсы, 2019. Т. 46. № 2. С. 149–160.

Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Хомяков П.В., Шынбергенов Е.А. 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., Спириин Ю.А. Оценка геоэкологического состояния малых водотоков полейдерных земель: методический подход и картографическое обеспечение. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2022. Т. 28. № 2. С. 597–613.

Зотов С.И., Спириин 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.

Нагорнова Н.Н. Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области. Дисс. ... 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. Серия: 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 г. 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. С. 112–122.
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.

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.

Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial modelling of micropollutants in a strongly regulated cross-border lowland catchment. *Environmental Processes*, 2021. V. 8. P. 973–992.

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 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).

Chumachenko A.N., Khvorostukhin D.P., Morozova V.A. Building a hydrologically correct digital terrain model (on the territory of the Saratov region). *Bulletin of the Saratov University. New episode. Series: Earth Sciences*, 2018. V. 18. No. 2. P. 104–109 (in Russian).

Dzhamalov R.G., Mironenko A.A., Myagkova K.G., Reshetnyak O.S. et al. Spatio-temporal analysis of the hydrochemical composition and dissolution of water in the Northern Dvina basin. *Water Resources*, 2019. V. 46. No. 2. P. 149–160 (in Russian).

Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Khomyakov P.V., Shynbergenov E.A. Cartographic model of basin geosystems of small rivers in the catchment area of the Lena River. *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. *IKBFU's Vestnik (Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University). Series: Natural and Medical Sciences*, 2008. No. 1. 28 p. (in Russian).

Lata L. Determination of watershed boundaries for the WEAP model of the Vjosa River using QGIS software. *Journal of International Ecological Applications and Science*, 2020. V. 15(4). P. 203–215.

Lämmchen M., Klasmeier J., Hernandez-Leal L., Berlekamp J. Spatial modeling of micropollutants in a strictly regulated transboundary lowland watershed. *Ecological Processes*, 2021. V. 8. P. 973–992.

Nagornova N.N. Geoecological assessment of the state of shallow watercourses in the Kaliningrad Region. *Diss. ... PhD of geogr. sciences. Kaliningrad*, 2012. P. 8–19 (in Russian).

Nagornova N.N., Bernikova T.A., Tsupikova N.A. Hydrogeochemical characteristics of macro-rivers of the Kaliningrad region. *IKBFU's Vestnik (Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University). Series: Natural and Medical Sciences*, 2011. No. 7. P. 160–166 (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 river Prokhladnaya. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2014. No. 4. P. 70–77 (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).

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.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. No. 2. P. 597–613 (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).
