

УДК 504.45

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕКИ ТОБОЛ И КУРГАНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Несговорова Н.П., Савельев В.Г.

ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», Курган, e-mail: geograf@kgsu.ru

Курганская область относится к числу субъектов Российской Федерации с крайне ограниченными водными ресурсами, как по их количеству, так и по качеству вод. Основной водной артерией Курганской области является река Тобол. Ее вода используется для питьевого водоснабжения, в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте – в большинстве сфер деятельности. Основным источником централизованного водоснабжения г. Кургана по сей день остается Курганское водохранилище, расположенное на р. Тобол и введенное в эксплуатацию в 1962 г. Основной проблемой исследования явилось выявление с помощью математических методов основных факторов природного и антропогенного происхождения, влияющих на качество воды (его химический состав) р. Тобол в пределах Курганской области. Проведен разносторонний анализ физических характеристик, химического и микробиологического состава р. Тобол и Курганского водохранилища с использованием расчетных методов комплексного индекса загрязнения воды и критического показателя загрязнения. Методы корреляционного и факторного анализов способствовали выявлению внутрисредовых факторов, факторологический анализ – внешнесредового воздействия. Это позволило выявить динамику показателей химического загрязнения воды и ее основные тенденции от впадения р. Уй на границе с республикой Казахстан, по территории Курганской области до границ с Тюменской областью. Анализ компонентов химического загрязнения воды р. Тобол и Курганского водохранилища позволил сгруппировать загрязнители и выявить наличие техногенного, сельскохозяйственного факторов на определенных участках русла реки между конкретными створами, расположенными на территориях сельскохозяйственного либо промышленного пользования.

Ключевые слова: оценка качества воды, комплексный анализ, река, водохранилище

Исследование выполнено при поддержке ВОО «Русское географическое общество», грант № 07/2022-Р.

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE WATER QUALITY OF THE TOBOL RIVER AND THE KURGAN RESERVOIR

Nesgovorova N.P., Savelev V.G.

Kurgan State University, Kurgan, e-mail: geograf@kgsu.ru

The Kurgan region is one of the constituent entities of the Russian Federation with extremely limited water resources, both in terms of their quantity and quality of water. The main water artery of the Kurgan region is the Tobol River. Its water is used for drinking water supply, in industry, agriculture, transport - in most areas of activity. The main source of centralized water supply for the city of Kurgan to this day remains the Kurgan reservoir, located on the Tobol River and put into operation in 1962. The main problem of the study was to identify, using mathematical methods, the main factors of natural and anthropogenic origin that affect the quality of water (its chemical composition) of the Tobol River within the Kurgan region. A comprehensive analysis of the physical characteristics, chemical and microbiological composition of the Tobol River and the Kurgan reservoir was carried out using the calculation methods of the complex water pollution index and the critical pollution index. Methods of correlation and factor analysis contributed to the identification of environmental factors, factorological analysis - external environmental impact. This made it possible to identify the dynamics of indicators of chemical water pollution and its main trends from the confluence of the Uy River at the border with the Republic of Kazakhstan, across the territory of the Kurgan region to the borders with the Tyumen region. An analysis of the components of chemical pollution of the water of the Tobol River and the Kurgan Reservoir made it possible to group pollutants and identify the presence of technogenic, agricultural factors in certain sections of the river channel between specific sections located in agricultural or industrial areas.

Keywords: water quality assessment, integrated analysis, river, reservoir

Для Курганской области вопрос изучения качества водных ресурсов стоит очень остро в связи с тем, что регион в силу своих природных особенностей относится к числу субъектов Российской Федерации с крайне ограниченными водными ресурсами, как по их количеству, так и по качеству вод.

Основным источником централизованного водоснабжения г. Кургана является Курганское водохранилище, расположенное на р. Тобол и введенное в эксплуатацию в 1962 г.

По результатам Курганского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и материалов Департамента гражданской защиты, охраны окружающей среды и природных ресурсов Курганской области (в рамках СанПиНа для вод рыбохозяйственного пользования), в водах р. Тобол присутствуют «соединения меди, марганца, цинка, железа, магния, ионы аммония и нитрит-ионы, сульфаты, фосфаты (по Р), фториды, фенолы, нефтепродук-

ты, легкоокисляемые и трудноокисляемые органические вещества (по показателям БПК₅ и ХПК)» [1].

Рассмотрев возможности анализа накопленных собственных эмпирических данных, мы обратили внимание на работы С.И. Ларина [2, 3], в которых указано на необходимость комплексного мониторинга качества воды рек. Согласившись с авторами публикации, мы разработали процедуру комплексного мониторинга качества воды р. Тобол, в рамках которой вели сезонные наблюдения на каждом участке исследования. Кроме того, осуществляли территориальный мониторинг качества воды по створам реки.

Проведенный анализ усредненных годовых значений данных показателей по створам р. Тобол в рамках территории Курганской области и сравнительный анализ результатов по динамике показателей за четырехлетний период показал наличие колебаний как в динамике по створам каждого компонента в отдельности, так и колебания показателей рассматриваемых компонентов по годам.

Оценить степень загрязненности воды одновременно по широкому перечню показателей качества воды и классифицировать воду по степени загрязненности позволяет метод комплексной оценки с расчетом удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (далее – УКИЗВ).

Проведенная работа способствовала формированию представления о качестве воды р. Тобол и его динамике, однако не позволяет дать ответ на вопрос: каковы факторы формирования соответствующего качества воды для последующей разработки практических рекомендаций по учету данных факторов при водоподготовке для потребителей.

Основной проблемой явилось выявление основных факторов природного и антропогенного происхождения, влияющих на качество воды (химический состав) р. Тобол в пределах Курганской области.

Анализ имеющейся научно-практической базы позволил выделить следующее. Так, М.В. Рогова считает, и с ней нельзя не согласиться, что для решения комплекса водохозяйственных задач необходимо обосновать способы оценки химического состава воды [4]. В работе «Комплексное моделирование оценки качественных и количественных показателей воды рек», написанной J.H. Wang, W.H. Xiao, H. Wang, Z.K. Chai, C.W. Niu, W. Li, предлагается проводить комплексное моделирование [5]. Это нами и было сделано.

В то же время было проведено изучение возможностей использования интегрированного способа оценки состояния воды по гидрохимическим и биондикационным показателям, предложенного С.Ф. Лихачевым и Б.А. Артеменко [6].

Применение диатомовых водорослей в качестве организмов-индикаторов предлагают использовать O.S. Jakovljević, S.S. Popović, D.P. Vidaković, J. Krizmanić [7]. Данная методика интересна и, скорее всего, дает значимые результаты. Однако мы полагаем, что проведение сравнительного анализа даже на протяжении одного проточного водоема может вызвать затруднения, связанные со сравнением и сопоставлением качественного состава и количественной оценкой данных водорослей в качестве индикаторов динамики состояния химического состава воды водоема.

Микробиологическую оценку качества воды рек используют Л.А. Виноградова, Е.В. Галанина для оценки условий нереста [8]. Данной методикой можно воспользоваться для определения наличия питательной среды для развития микрофлоры.

В процессе проведения собственных исследований, взяв за основу работы А.В. Мельниковой, О.С. Любиной, М.А. Гвоздаревой, Р.Р. Нуретдинова, М.А. Горшкова, которые предлагают использовать биологический способ оценки качества воды водохранилища на основе исследования фитопланктона, зоопланктона и зообентоса [9], разработали собственную методику биомониторинга качества воды р. Тобол и Курганского водохранилища.

В нашей работе проведен анализ микрофлоры с учетом экосистемной оценки качества воды реки. Аналогичная методика предложена L. Mena-Rivera, R. Sánchez-Gutiérrez, O. Vásquez-Bolaños, A. Fonseca-Sánchez, C. Gómez-Castro, A. Rodríguez-Rodríguez [10].

В проведенной работе использованы расчеты комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) и критический показатель загрязненности (КПЗ) по марганцу как имеющему самые высокие количественные показатели. Проведенные исследования и анализ их результатов позволили подобрать подходы к разработке модели динамики химического состава воды р. Тобол и Курганского водохранилища и факторов ее определяющих.

Цель исследования – построение и верификация модели влияния факторов различной природы на качество воды (химический состав) р. Тобол в пределах Курганской об-

ласти на основе методов математического анализа показателей химического состава воды изучаемого водоема.

Объект исследования – вода р. Тобол в границах Курганской области.

Предмет исследования – динамика химического состава воды и факторы ее определяющие.

Материалы и методы исследования

Река Тобол берет начало в месте слияния р. Бозбие и Кокпекты на границе Оренбургской области РФ и Костанайской области Республики Казахстан, впадает в р. Иртыш с левой стороны на территории Тюменской области. Длина реки 1591 км, общая площадь водосбора 426000 км². Протяженность Тобола по территории Курганской области 428 км, река имеет 6 крупных притоков.

Долина р. Тобол шириной 10–40 км. Пойма двухсторонняя, местами шириной до 25 км, сильно изрезана старицами, озерами, заболоченными ложбинами. Русло Тобола извилистое. Ширина его колеблется от 30–50 до 200 м.

На всем протяжении Тобола и его основных притоков расположено большое

количество регулирующих водохранилищ и прудов, которые находятся в Курганской и Челябинской областях Российской Федерации, а также на территории Республики Казахстан. Курганское водохранилище замыкает каскад водохранилищ на р. Тобол и его притоках. Основное его назначение – сезонное регулирование стока для обеспечения промышленного и хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Кургана и Курганского промышленного района.

В процессе исследования отбор проб воды осуществлялся в пяти створах на р. Тобол в пределах Курганской области (рис. 1).

Отбор проб воды проводился совместно с сотрудниками Курганского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и самостоятельно. Оборудование для отбора проб воды: емкости из прозрачного стекла (или сосуды из полиэтилена) с притертой пробкой. Посуда омывалась несколько раз отбираемой водой. Емкости, наполненные пробой воды, подписывались. Усредненную пробу речной воды отбирали в верхней трети общей глубины реки в местах с наиболее сильным течением.

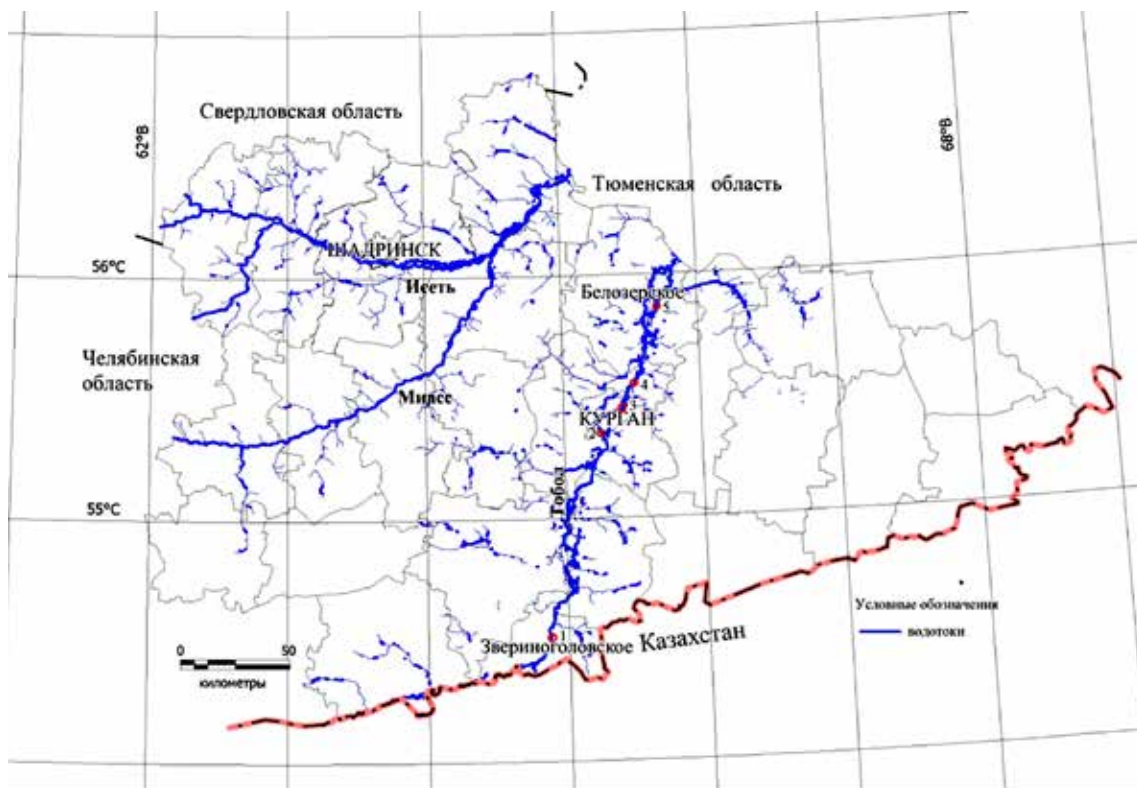


Рис. 1. Расположение створов по р. Тобол.

Примечание. 1 створ – с. Звериноголовское, 2 створ – мкр-н Арбинка, 3 створ – п. Смолино, 4 створ – д. Костюсово, 5 створ – с. Белозерское

В лаборатории комплексных экологических исследований кафедры географии, фундаментальной экологии и природопользования Курганского государственного университета проведен лабораторный анализ проб воды. Сравнительный анализ полученных данных проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.2.04-77. «Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов» [11]. Определяли: водородный показатель (потенциометрическим методом), растворенный кислород (кондуктометрическим и йодометрическим методами), сухой остаток, нефтепродукты (гравиметрическим методом), гидрокарбонаты, оксид углерода (титриметрическим методом), хлориды (аргентометрическим методом), нитратный азот, сульфат-ион, марганец, медь, цинк (колориметрическим методом). Микробиологический показатель определялся методом культивирования воды на питательной среде, в качестве которой использовались среда сабуро и мясо-пептонный агар. В работе задействованы следующие приборы: рН-метр-милливольтметр рН-410, кондуктометр – иономер Анион-4100, кислородомер – Анион 7040, спектрофотометр LEKISS 2107 UV [12].

Для разработки математической модели необходимо подобрать соответствующие методы. В нашей работе использовался корреляционный анализ, измерялась теснота связи между двумя или более переменными. Проведен факторный анализ материалов (отбор факторов, классификация и систематизация факторов, моделирование взаимосвязей между результативными и факторными показателями, расчет влияния факторов), проведена оценка роли каждого из факторов.

В процессе исследования проведен анализ материалов по показателям химического состава воды р. Тобол в границах Курганской области Департамента по природным ресурсам и охране окружающей среды (за 2014–2019 гг.), материалов отчетов ОАО «Водный союз», накопленных сведений собственных исследований, в том числе результатов лабораторного анализа воды р. Тобол по створам в весенне-летний период (2014–2019 гг.), Курганского водохранилища в 2018–2019 гг. (по всем сезонам года). Собранный материал подвергнут анализу.

При подборе показателей мы расширили анализ качества воды, включив в него анализ некоторых физических показателей воды, (органолептических), расширили рамки физико-химического анализа, включив определение кислотности, жесткости

воды, содержание растворенного кислорода, некоторых анионов (нитрат-ионов, хлоридов и др.). Статистическая обработка данных осуществлялась на основе факторного и корреляционного анализа в программе MS Excel, программе «Статистика 6.0». Оценка влияния факторов окружающей среды на качество воды проводилась на основе моделирования, построения модели внешне среднего воздействия и расчета коэффициентов корреляции Пирсона между фактором и показателем качества воды.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты оценки физико-химических характеристик воды

Прозрачность воды в р. Тобол и Курганском водохранилище в 2018–2019 гг. от 27 до 30 см, вода – прозрачная.

Кислотность. Вода в р. Тобол относится к слабощелочной с диапазоном рН от 7,66 до 8,2 ед. В границах Курганского водохранилища рН воды изменяется по сезонам года от нейтральной до слабощелочной.

Уровень содержания кислорода в воде р. Тобол и Курганского водохранилища колеблется от 3,25 до 4,9 мг/л на протяжении всего года. Факторами влияния на изменение уровня растворенного кислорода в воде являются температурный режим, уровень жесткости воды. Уровень кислорода снижается при понижении температуры, минимальный уровень регистрируется в зимний период.

С повышением уровня содержания солей жесткости наблюдается снижение растворимости кислорода. Данные соли попадают в воду из природных источников (родников, известковых и солевых отложений) и из бытовых и промышленных сточных вод. Выявлены незначительные сезонные колебания в осенние, зимние, весенние периоды.

Содержание катионов в воде и факторы его определяющие. Среди содержащихся в воде катионов особое значение имеет марганец. Содержание марганца характеризуется высокими значениями и сезонными колебаниями концентрации. Так, превышение нормы ПДК составляет 30–50 раз в весенний и осенний периоды и 10–20 раз в зимние и летние периоды.

Природное поступление марганца в реку осуществляется в процессе выщелачивания минералов и марганцевых руд (браунит, псиломелан, черная охра, пиролюзит). Загрязнение воды реки марганцем происходит в промышленной зоне (металлургия).

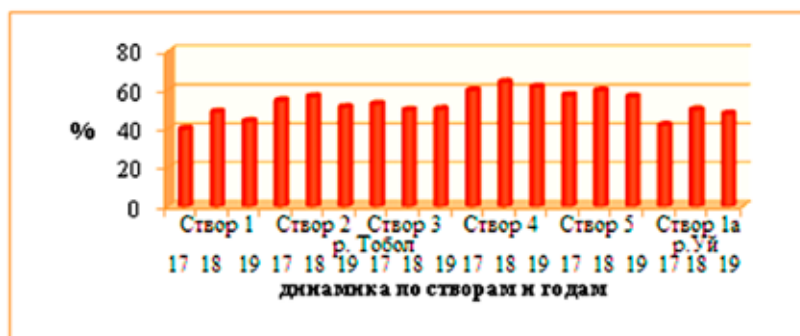


Рис. 2. Динамика комбинаторного индекса загрязненности воды р. Тобол (2017–2019 гг.).
Примечание. Створ 1 – с. Звериноголовское, створ 2 – Арбинка, створ 3 – Смолино, створ 4 – д. Костюсово, створ 5 – с. Белозерское (створы на р. Тобол), створ 1а – с. Усть-Уйское (р. Уй перед впадением в р. Тобол)

В окружающих породах он содержится как смесь с другими металлами в виде гидроксидов. Марганец в коллоидной и растворенной форме связан с органическими соединениями образованием комплексов с сульфатами и бикарбонатами. С хлором марганец образует комплексы реже.

Усвоение металла в растворенном виде водорослями происходит при аэробных условиях, при этом Mn (II) окисляется до Mn (IV), который осаждается в виде оксида MnO₂. Важными факторами в данных процессах являются температура воды, количество растворенного в воде кислорода и pH (кислотность воды).

В содержании других катионов, как и анионов наблюдается резкий скачок в 2018 г.

Содержание анионов в воде. Содержание нитратов в воде р. Тобол и Курганского водохранилища колеблется в пределах 7,5–20 мг/л, что соответствует нормативам для водоемов рыбохозяйственного назначения. Нитраты попадают в водохранилище из почвы расположенных рядом с водозаборами садоводческих кооперативов и сельскохозяйственных угодий.

Уровень содержания хлоридов в воде составляет 94,3–202,35 мг/л. Наибольшее содержание хлоридов в воде в зимний период связано со снижением скорости течения реки, снижается степень ее самоочищения. Основным источником хлоридов в воде являются коммунальные сточные воды г. Кургана и его окрестностей.

Кроме того, в воде р. Тобол от входного створа до крайнего створа наблюдается снижение среднегодовых концентраций сульфатов в 1,4 раза, растут концентрации трудно окисляемых органических веществ в 1,2 раза, азота аммония в 5,5 раза, азота нитритов в 5,7 раза.

Динамика комбинаторного индекса загрязненности воды р. Тобол

Построенная по трем годам (2017–2019) диаграмма комбинаторного индекса (рис. 2) показывает отсутствие единообразия по загрязненности воды в р. Тобол во времени и на всем протяжении по территории Курганской области.

Нельзя выделить ни одного створа с одинаковым комбинаторным показателем загрязненности по годам. Во временной динамике загрязненности по всем створам выделяется 2018 г. своим скачком загрязненности (рис. 2). Вода на всех створах р. Тобол характеризуется как «грязная», относится к 4 классу опасности, разряду Б. Лишь вода первого створа р. Тобол (у с. Звериноголовское кроме 2018 г.) относится к 4 классу опасности, разряду «А».

По отдельным компонентам загрязнения рассчитан КПЗ (критический показатель загрязненности). Это относится к содержанию в воде соединений марганца. Его КПЗ колеблется от 10,5 (р. Уй, 2018 г.) до 16 (створ Смолино на р. Тобол, 2018 г.).

Результаты анализа химического состава воды р. Тобол по створам в границах Курганской области

В исследовании нами использованы четырехлетние данные «усредненных годовых показателей химического состава воды рек, протекающих по территории Курганской области», ежегодно публикуемых в Докладе Департамента по природным ресурсам и охране окружающей среды администрации Курганской области (Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Курганской области, 2018–2020) [13].

Динамика химических компонентов воды р. Тобол (2016–2019 гг.)

Место пробы / Показатели	Год	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	P	SO ₄	N	Нефть	XПК
		доли ПДК									
Створ 1 Звериноголовское	2016	7,5	17,6	1,0	1,1	2,2		2,2			1,3
	2018	6,6	29,0	1,1	1,1	1,7		3,2	1,2	2,9	1,3
	2019	4,5	17,8	1,2	1,1	1,4		2,1	1,2	2,4	1,3
Створ 2 Арбинка	2016	2,8	23,9	2,1	2,1		2,8	2,5		1,5	2,5
	2018	8,5	46,2	1,5	1,6			1,8		4,0	1,8
	2019	6,6	17,3	1,5	1,6	1,1		1,9		3,3	1,4
Створ 3 Смолино	2016	5,8	35,1	1,7	1,3	1,1	2,8	2,3		1,2	2,1
	2018	8,8	51,2	1,6	1,8			1,5		3,9	1,6
	2019	7,8	24,9	1,6	1,0	1,1		1,7		3,4	1,5
Створ 4 Костоусово	2016	6,7	21,5	2,0	2,0		1,9	2,6	1,6	2,2	2,2
	2018	8,8	40,3	1,6	1,8	3,4		1,6	2,9	3,0	1,5
	2019	8,3	22,2	1,7	1,0	1,0		1,8	2,2	3,2	1,4
Створ 5 Белозерка	2016	5,8	30,4	2,4	2,3	1,0	1,9	2,6	1,6	1,0	1,5
	2018	7,5	31,4	1,5	1,6	1,3		1,3		3,7	3,1
	2019	7,3	15,5	1,0	1,3			1,3	2,2	3,0	1,6

Проведенный анализ данных по основным показателям состава воды р. Тобол за 2016–2019 гг. и расчет коэффициентов (долей ПДК), полученных от деления значений концентрации каждого компонента на его ПДК, позволил сделать следующие выводы (таблица).

1. Резкий скачок загрязненности воды р. Тобол и Курганского водохранилища можно объяснить сложившимися гидрометеорологическими особенностями 2018 г. Так, зима 2017–2018 гг. была «умеренно морозная, малоснежная. Весна – затяжная, ветреная, дождливая, холодная с заморозками до начала июня. Лето было умеренно теплым с достаточным количеством осадков, начало осени (сентябрь) – сухим» (Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Курганской области, 2019) [13].

Пики половодья оказались ниже средних многолетних «на 1–2 метра в створах р. Тобол, в г. Кургане – ниже на 2,6 м. Обеспеченность максимальных уровней составила на Тоболе 75–80%, на Тоболе весеннее половодье 2018 г. было маловодным» (Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Курганской области, 2018) [14].

При высоком водопотреблении это способствовало скачку концентраций загрязнителей в воде.

2. В процессе анализа выявлены сходные тенденции в динамике коэффициентов ПДК химических компонентов воды, как

по створам, так и во временном отношении (2016–2019 гг.) которые можно объединить в группы.

Выявлены следующие тенденции в динамике химического состава воды р. Тобол:

А – прослеживаются сходные достаточно низкие значения показателей по загрязнителям на входе в территорию области и на створе р. Тобол в с. Звериноголовском (первый створ в пределах Курганской области). Далее наблюдается рост показателей в границах г. Кургана (створы Арбинка – Смолино) с последующим снижением за пределами города (створы Костоусово – Белозерское). Это характерно для содержания в воде ионов меди и марганца. Как мы предполагаем, причины его скрыты в природном происхождении вымытых компонентов из горных пород на входе на территорию региона и последующем росте концентраций за счет соединений техногенного происхождения в пределах г. Кургана. Последующее разбавление и прекращение новых техногенных поступлений снижает концентрации данных компонентов за пределами створов г. Кургана (рис. 1, таблица).

Б – стабильные показатели на входе в Курганскую область и первом створе (с. Звериноголовское) с последующим их ростом на территории г. Кургана и на первом створе за его границами (с. Костоусово), снижение показателей на грани-

це территории Курганской области (створ с. Белозерское). Отражают содержание в воде нефтепродуктов и показатели ХПК и БПК. Это обусловлено комплексным характером, сочетающим природное и техногенное происхождение тяжелой и легкой фракций органики в воде, нефтепродуктов. Может быть связано со смывом органики с полей и нефтепродуктов с обочин дорог и из нефтепродуктопроводов во время аварийных выбросов.

В – Наблюдается нестабильное содержание компонента в воде с постоянными колебаниями: снижение показателя при переходе границы области на первом створе (село Звериноголовское, с последующим ростом в границах г. Кургана (створы Арбинка и Смолино), снижение за границами города и стабилизация концентрации (у с. Костусово и Белозерское). Так ведет себя цинк. Похожее явление наблюдается в динамике содержания в воде железа и магния. Данные явления сходны в пределах городской промышленной зоны.

Г – Динамика содержания в воде сульфатов и азота аммония. Их содержание растет в воде р. Тобол, протекающей по сельской местности и снижается в пределах города, снова повышаясь за его пределами. Данное явление может быть связано с деятельностью сельскохозяйственных предприятий, использованием на полях удобрений и их смывом в воды реки во время паводков и дождей, особенно осенних.

Д – Содержание фторидов и азота нитритного в воде р. Тобол нестабильно, определяется в воде р. Уй, впадающей в Тобол на юге области, не выявляясь в значимых

показателях уже на первом створе (с. Звериноголовское), вероятнее всего в результате смешения вод и падения концентрации. Однако снова их концентрация растет за пределами г. Кургана (створы с. Костусово и Белозерское).

Микрофлора воды и ее состав

Видовой состав микрофлоры представлен родами *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Sarcina*, *Mycobacterium*, *Actinomyces* (рис. 3).

В теплый период в воде реки обнаружены спорообразующие формы рода *Bacillus*. Такое разнообразие микрофлоры связано с попаданием в воду частиц почвы, растительных и животных остатков.

Вспышки численности отдельных видов микроорганизмов возникают вследствие попадания в воду почвенных микроорганизмов в периоды высокого половодья и сильных дождей (с весны по осень). Высокий уровень содержания органики в воде, температурный режим активизируют рост численности микроорганизмов, обуславливают сезонную динамику сменяющих друг друга популяций микрофлоры. Высокая численность эвтрофной группы бактерий и высокое содержание кислорода в воде с июня по октябрь позволяют отнести р. Тобол к водотокам эвтрофного типа.

Численность микроорганизмов подвержена сезонным колебаниям с минимумом в зимний и максимумом в весенне-летне-осенний сезоны. Вода в зимний период характеризуется олигосапробностью, а в весенне-летне-осенний сезоны – постепенным нарастанием в зону бета-мезосапробности.

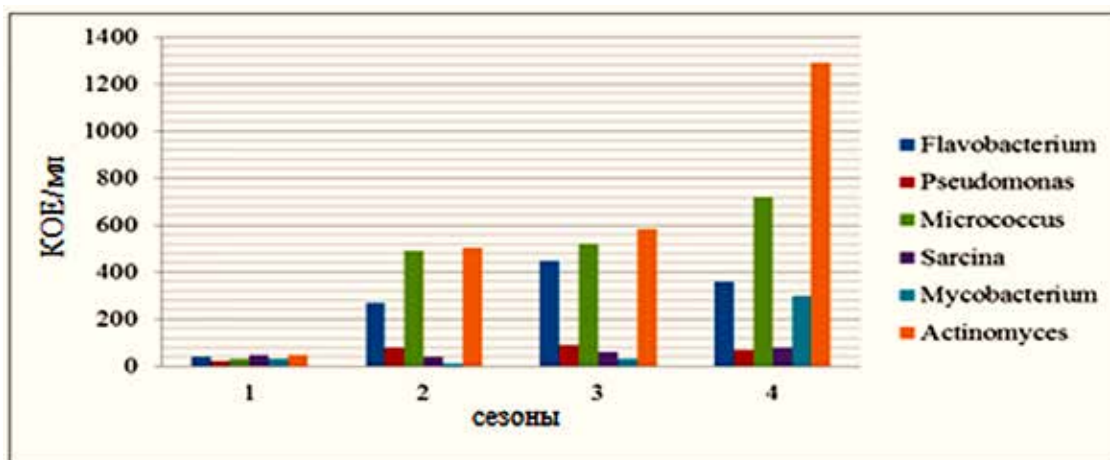


Рис. 3. Бактериологический состав воды в пределах Курганского водохранилища.
Примечание. 1 – зима, 2 – весна, 3 – лето, 4 – осень

Следуя классификации В.Н. Жукинского [14], воды р. Тобол в летние месяцы можно отнести к третьему классу качества по микробиологическим показателям – «удовлетворительно чистая» (от 1300 до 3100 КОЕ/мл). Для нее характерны процессы аэробной деструкции органики, и к зиме происходит самоочищение реки, улучшается качество воды, она относится по данному показателю ко второму классу качества – «чистая» (от 200 до 600 КОЕ/мл).

Проведенный корреляционный и факторный анализ показателей среднегодового химического состава воды позволил сформулировать следующее.

1. Выявлена корреляционная зависимость между содержанием в воде марганца и меди ($r = 0,4496$), что может быть подтверждением их природного происхождения на территории относительно низкого их содержания в воде.

2. Выявлена зависимость между содержанием в воде меди, марганца и нефтепродуктов ($r = 0,5858$). Это может быть подтверждением того, что в воде есть примеси данных элементов техногенного происхождения.

3. Выявлено взаимодействие между содержанием сульфатов и фенола, фосфатов и БПК (связь прямая, $r = 0,5453$, $r = 0,4436$) и с БПК ($r = 0,4333$) и с содержанием азота аммонийного (связь обратная, $r = -0,4921$). Это может быть свидетельством появления данных компонентов в воде с полей сельхозпроизводителей, а процессы, происходящие между данными компонентами и организмами, живущими в воде, могут быть причиной роста БПК.

4. Количество растворенного в воде фосфора в виде фосфатов противоположно содержанию ионов меди. Объясняется это тем, что в результате их взаимодействия могут образовываться нерастворимые соединения ($r = -0,5774$). Высокое содержание фосфора в воде при низком содержании меди за пределами городских территорий может быть свидетельством появления его в воде в результате сельскохозяйственной деятельности.

5. Содержание магния в воде неоднородно. С одной стороны, оно связано с содержанием сульфатов (скорее всего, в удобрениях, $r = 0,5448$), а с другой – с фенолом ($r = 0,5094$), который может быть привнесен с водами притоков и иметь техногенное происхождение.

6. Содержание растворенного железа связано с содержанием азота аммонийного ($r = 0,5196$). Взаимодействие в виде

природного происхождения железа и его вымывания из рудоносных горизонтов (на юге и юго-западе области) в сочетании с азотом аммонийным сельскохозяйственной деятельностью.

7. Содержание нефтепродуктов и фосфора в воде имеет сложное обратное взаимодействие ($r = -0,6028$). Нефтепродукты в воде реки имеют техногенное происхождение, фосфор – продукт сельскохозяйственной деятельности.

В целом проведенный корреляционный анализ позволил построить факторные модели взаимосвязей в химическом составе воды р. Тобол.

Факторы, формирующие качество химического состава воды

1. Группа компонентов в воде р. Тобол в границах г. Кургана (створы Арбинка – Смолино). Они по происхождению имеют техногенный характер (продукты производственной деятельности промышленных предприятий города, в первую очередь машиностроения), автотранспорта. Взаимодействие между ними имеет связь средней силы ($r = 0,5404$). К группе относятся соединения меди, марганца и нефтепродукты (техногенный фактор).

2. Группа компонентов в воде р. Тобол и Курганского водохранилища на участках территории активной сельскохозяйственной деятельности. Это между створами с. Звериноголовское и Арбинкой (возделывание зерновых и животноводство, садоводческие кооперативы) и между створами с. Костоусово и Белозерское (возделывание овощной продукции для г. Кургана и полеводство). Входят коррелирующие между собой соединения магния (с сульфатами и фосфатами), меди (с фосфатами и сульфатами). Их происхождение, возможно, связано с попаданием в воду при смыве с полей удобрений (фосфорных) и пестицидов (серосодержащих). Взаимодействие средней силы ($r = 0,4550$). Это сельскохозяйственный фактор загрязнения.

3. Фактор комплексного воздействия хозяйственной деятельности из взаимодействия между ионами меди и сульфат-ионами используемых пестицидов. С ними связаны фосфат-ионы и нефтепродукты. Данное взаимодействие на участке между створами с. Звериноголовское (первый на территории Курганской области) и створом Арбинки на входе в городскую территорию Кургана. Сила взаимодействия – средняя ($r = 0,46561$).

4. Фактор комплексного взаимодействия промышленных стоков и продуктов сельхозпроизводителей складывается из связи ионов железа, цинка, меди (гальванического производства), магния, меди и сульфат-ионов из удобрений и пестицидов и нефтепродуктов автотранспорта. Выявлено на выходе из г. Кургана между створами Смолино (граница Кургана) и с. Костоусово. Здесь происходит смешение вод р. Тобол и р. Черная, имеющей воды, обогащенные стоками промышленных предприятий и коммунальными стоками. Уровень взаимодействия – средний ($r = 0,4539$).

5. Фактор самоочищения. Взаимодействие между биологическим окислением кислорода (БПК), ионами аммония и сульфат-ионами с одной стороны и катионами железа, цинка, меди. Комплекс используется в экосистеме водоема продуцентами (фото- и хемосинтезирующими организмами). Уровень взаимосвязи внутри фактора ниже среднего ($r = 0.3668$). Взаимодействие может создаваться на отрезке между впадением р. Уй в реку Тобол и створом (с. Звериноголовское). А также между створом у с. Костоусово и створом у с. Белозерское.

*Факторологический анализ
причинно-следственных связей*

Данный раздел статьи посвящен выявлению внешнесредового воздействия на динамику свойств воды р. Тобол. Анализ научных данных позволил разработать модель влияния внешних факторов на состав природных вод. В ядре модели – показатели качества воды (органолептические, физико-химические, химические биологические).

Как считает Н.В. Миклашевский, «к лимитирующим факторам следует отнести сточные воды, залегающие горные породы, почвенный покров, климатические условия» [15]. Эти факторы воздействуют на формирование качества природных вод. Так, залегающие горные породы являются основными факторами формирования минералогического состава природных вод.

К косвенным факторам (определяющим условия, в которых действуют основные) «следует отнести рельеф, гидрологический режим, природные катастрофы, атмосферные осадки, биологические факторы, смешивание вод». Их относим к фоновым факторам нашей модели. Так, от рельефа зависит размер поверхностного стока, дренирование подземных вод, перераспределение выпавших на земную поверхность осадков.

При воздействии всех факторов на компоненты природной воды получаем качество природной воды.

По результатам нашего исследования к лимитирующим внешнесредовым факторам следует отнести не только особенности климата, сбросы сточных, а и трансграничный перенос загрязняющих веществ, смешение природных вод. Доказательством того является динамика качества воды. Так, в пункте наблюдения с. Звериноголовское класс качества воды 4, следовательно, из Казахстана в Курганскую область поступает загрязненная вода. Трансграничный перенос загрязняющих веществ по р. Тобол из Республики Казахстан будет главным фактором, влияющим на качество воды на входе в территорию области.

Относительно крупными притоками р. Тобол в пределах Курганской области являются р. Уй, Убаган, Куртамыш, Утяк, Черная. При попадании вод этих притоков наблюдается смешение вод. Основное влияние на качество воды Тобола будет оказывать вода р. Уй. По значению УКИЗВ она соответствует 4 классу качества воды и характеризуется как «грязная». Наибольшую долю вносит марганец, который вымывается из залегающих горных пород в Казахстане. При впадении Уя в Тобол происходит смешение загрязненных вод.

Река Черная является притоком Тобола в пределах г. Кургана. Она полностью сформирована прямыми сбросами сточных вод предприятий города и жилищно-коммунальными стоками от населения после их очистки на Курганских городских очистных сооружениях канализации. В результате этого качество воды р. Тобол ниже впадения р. Черная ухудшается.

Сброс сточных вод. В Кургане АО «Водный союз» в Курганское водохранилище осуществляет сброс промывных сточных вод от Арбинских водозаборных сооружений и центра города. На качество воды водохранилища будут влиять ливневые стоки, собирающие с территории города загрязняющие вещества, в том числе нефтепродукты.

Климат характеризуется большими сезонными и суточными колебаниями температуры воздуха. На теплый период года приходится 75–79% от суммы осадков. Выпавшие атмосферные осадки на короткий период уменьшают минерализацию воды. Однако в результате испарения поверхностных вод минерализация снова растет.

К фоновым факторам нами отнесены явление водохранилища, донные отложения,

маловодность реки, паводки и наводнения, биологические факторы, залегающие горные породы, почва прилегающих территорий, природные катастрофы.

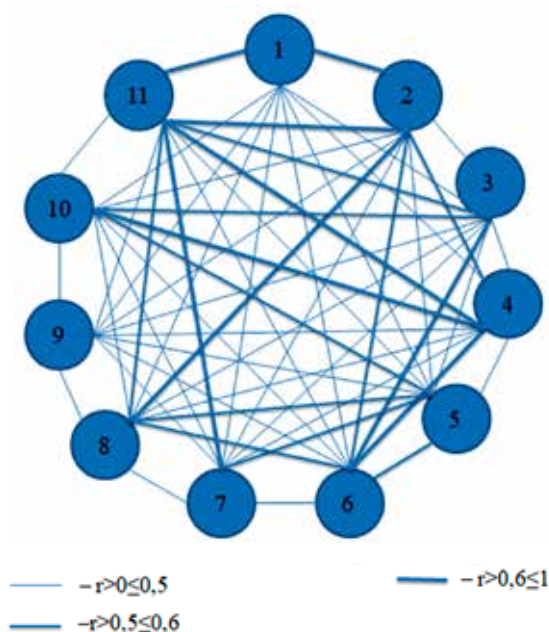


Рис. 4. Коррелограмма показателей воды р. Тобол ($p \leq 0,05$).

Примечание: цифрами обозначены показатели:
 1 – рН, 2 – температура, 3 – прозрачность,
 4 – содержание кислорода, 5 – сухой остаток,
 6 – концентрация марганца, 7 – концентрация нитратов,
 8 – концентрация хлоридов,
 9 – концентрация сульфатов,
 10 – концентрация нефтепродуктов,
 11 – общая численность микроорганизмов

В Курганском водохранилище наблюдается интенсивное заиление, сопровождающееся снижением средних глубин и ростом нагрева воды в летний период, в сочетании с загрязнителями это приводит к зарастанию и цветению воды. В результате снижается концентрация кислорода в воде, интенсивность процесса окисления загрязняющих веществ и создается неблагоприятная ситуация для гидробионтов.

В водохранилище система «вода – донные отложения» подвижна. Загрязняющие вещества депонируются в донных осадках, это приводит к вторичному загрязнению воды.

Река Тобол выше по течению зарегулирована целым рядом гидроузлов, включая крупные Верхне-Тобольское и Каратамарское водохранилища. Это резко снижает естественный сток на границе между Россией и Казахстаном. Объемов для разбав-

ления грязных сточных вод, поступающих в реку ниже г. Кургана, практически нет.

К природным катастрофам следует отнести паводки и наводнения, когда уровень воды достигает больших отметок. В результате – затопление территории дачных кооперативов и поселков, находящихся в пойме р. Тобол, при котором в воду с затопляемых территорий попадают твердые бытовые отходы, загрязняющие вещества, в том числе удобрения, компоненты дорожных покрытий и т.д.

В летний период в связи с повышением температур происходит ухудшение качества воды по микробиологическим показателям, как результат воздействия биологического фактора – несоответствие требованиям санитарных правил и нормативов.

Установлена корреляционная зависимость между температурным режимом воды и микробиологическим компонентом, так как температура воды является одним из основополагающих факторов для жизнедеятельности бактерий.

На основании проведенного анализа к группе фоновых факторов был добавлен режим воды р. Тобол в зимний период, который оказывает влияние на динамику уровня жесткости воды.

Отдельно выделена группа экотоксикантов, как интегрирующий компонент лимитирующих факторов (рис. 4).

Заключение

Курганская область относится к числу субъектов Российской Федерации с крайне ограниченными водными ресурсами, как по их количеству, так и по качеству вод.

1. Основной проблемой исследования явилось выявление с помощью математических методов основных факторов природного и антропогенного происхождения, влияющих на качество воды (его химический состав) р. Тобол в пределах Курганской области, построение и верификация соответствующей модели.

2. Выявлена динамика показателей химического загрязнения воды и ее основные тенденции на протяжении от впадения р. Уй на границе с республикой Казахстан, по территории Курганской области до границ с Тюменской областью. Выявленные в динамике химических компонентов загрязнения различия позволили объединить данные компоненты в группы и предположить возможные источники постоянного или временного сброса.

3. Проведенный корреляционный анализ взаимодействия компонентов химического загрязнения позволил выявить его силу и направленность. Результаты анализа компонентов химического загрязнения воды р. Тобол и Курганского водохранилища позволили сгруппировать их, обозначить наличие техногенного, сельскохозяйственного факторов на участках между створами, расположенными в территориях сельскохозяйственного либо промышленного пользования. Определено наличие двух комплексных факторов на границах их взаимодействия и фактор самоочищения воды.

4. Большая протяженность р. Тобол с юга на север способствует формированию особого режима формирования вод реки и их качества. К лимитирующим внешнесредовым факторам, влияющим на состав воды исследуемых объектов, следует отнести трансграничный перенос загрязняющих веществ, смешение природных вод, особенности климата, сбросы сточных вод.

5. Выявлена зависимость качества воды р. Тобол и Курганского водохранилища от биологического фактора. Установлена зависимость между температурным режимом воды, рН, содержанием кислорода и микробиологическим компонентом.

Отдельно выделена группа экотоксикантов, как интегратор лимитирующих факторов. К группе фоновых факторов добавлен режим воды, связанный с зимней меженью р. Тобол, оказывающей влияние на динамику жесткости воды, концентрацию загрязнителей в зимний период.

В целом разработанная модель влияния факторов различной природы на качество воды (химический состав) р. Тобол и Курганского водохранилища проверена в процессе исследования.

Список литературы

1. Постановление Правительства Курганской области от 14 октября 2013 г. № 498 «О государственной Программе Курганской области “Природопользование и охрана окружа-

ющей среды Курганской области в 2014–2020 годах”» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.priroda.kurganobl.ru/5340.html> (дата обращения: 10.09.2022).

2. Несговорова Н.П., Савельев В.Г., Иванцова Г.В., Фирюлина И.И. Мониторинг качества вод притоков р. Тобол // Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 114–121.

3. Ларин С.И. Физико-географические условия формирования качества поверхностных вод Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2011. № 12. С. 70–77.

4. Рогова М.В. Оценка гидрохимических показателей качества воды реки Яхромы // Естественные и технические науки. 2020. № 1 (139). С. 45–55.

5. Wang J.H., Xiao W.H., Wang H., Chai Z.K., Niu C.W., Li W. Integrated simulation and assessment of water quantity and quality for a river under changing environmental conditions. Chinese Science Bulletin. 2013. No. 58 (27). P. 3340–3347.

6. Лихачев С.Ф., Артеменко Б.А. Гидрохимическая и биоиндикационная оценка качества воды реки Миасс // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. 2011. № 6. С. 298–304.

7. Jakovljević O.S., Popović S.S., Vidaković D.P., Krizmanić J., Stojanović K.Z. The application of benthic diatoms in water quality assessment (Mlava river, Serbia). Acta botanica croatica. 2016. No. 75 (2). P. 199–205.

8. Виноградова Л.А., Пархомчук Т.К. Комплексные санитарно-микробиологические критерии оценки качества водных объектов в условиях возрастающей антропогенной нагрузки // Гигиена и санитария. 1991. № 1. С. 24–26.

9. Мельникова А.В., Любина О.С., Гвоздарева М.А., Нуретдинов Р.Р., Горшков М.А. Оценка качества воды Нижнекамского водохранилища по гидробиологическим показателям // Вода: химия и экология. 2019. № 3 (6). С. 67–72.

10. Mena-Rivera L., Sánchez-Gutiérrez R., Vásquez-Bolaños O., Fonseca-Sánchez A., Gómez-Castro C., Rodríguez-Rodríguez A. Ecosystemic assessment of surface water quality in the Virilla river: towards sanitation processes in Costa Rica. Water (Switzerland). 2018. No. 10 (7). P. 845.

11. ГОСТ 17.1.2.04-77. «Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026772> (дата обращения: 10.09.2022).

12. Несговорова Н.П., Иванцова Г.В., Неумывакина Н.А., Савельев В.Г. Организация научно-исследовательской деятельности студентов: теоретико-прикладной аспект. Курган, 2017. 352 с.

13. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Курганской области в 2019 году. Курган, 2020. 190 с.

14. Жукинский В.Н., Окснюк О.П., Олейник Г.Я., Кочелева С.И. Принципы и опыт построения экологической классификации качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1981. Т. 17. № 2. С. 38–40.

15. Миклашевский Н.В. Очистка сточных вод по технологии МБР // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2014. № 12 (156). С. 30–37.