

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ р. УРАЛ ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЕТИ МОНИТОРИНГА

© 2024 г. Н. В. Кирпичникова^а, *, М. М. Трофимчук^б, М. Ю. Кондакова^б, О. Л. Романюк^б,
Т. Б. Фашевская^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^бГидрохимический институт, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: nkirp@list.ru

Поступила в редакцию 01.03.2024 г.

После доработки 30.04.2024 г.

Принята к публикации 02.05.2024 г.

По многолетним данным гидрохимического мониторинга Росгидромета установлены пространственно-временные закономерности изменения качества воды р. Урал. Выявлены тенденции изменения содержания различных загрязняющих веществ в речной воде за период 1986–2021 гг. Проведена оценка влияния межгодовой и внутригодовой динамики водного стока на качество воды. Установлено, что однозначной зависимости загрязненности речных вод от водности или сезона года в бассейне р. Урал не существует. Показано, что на уровень загрязнения речных вод как в многоводные, так и маловодные периоды существенное влияние оказывают точечные и диффузные источники загрязнения, расположенные на разных участках речной сети.

Ключевые слова: речной бассейн, гидрохимический мониторинг, точечные и диффузные источники загрязнения, многолетние тенденции изменения качества воды, влияние водности на формирование качества воды.

DOI: 10.31857/S0321059624050116 EDN: VXBSZK

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и интенсивной эксплуатации природно-ресурсного потенциала водосборов крупных рек в последнее время актуальной становится проблема водопользования. Одна из таких рек, водосбор которой характеризуется высоким уровнем антропогенной нагрузки, — трансграничная р. Урал, протекающая по территориям Российской Федерации и Республики Казахстан. Участки водосбора р. Урал расположены в пределах границ экономически развитых субъектов РФ: Оренбургской области, Республики Башкортостан и Челябинской области. Основная цель данного исследования — выявление пространственно-временных закономерностей изменения качества воды р. Урал и его притоков на основе анализа многолетних рядов данных, полученных в рамках мониторинга состояния и загрязнения поверхностных вод суши, а также оценка влияния изменений водности на качество речных вод.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Площадь водосбора р. Урал ~230 тыс. км². Основной водно-ресурсный потенциал территории сосредоточен в р. Урал и ее наиболее крупных притоках — реках Сакмаре, Илек, Ори, а также в 1150 реках, из которых 29 имеют длину >100 км. Особенность гидрологического режима рек бассейна р. Урал — крайне неравномерная многолетняя и внутригодовая динамика водного стока [5–8], которая может существенным образом влиять на гидрохимический режим и качество речной воды [9, 10]. Основным источником питания рек бассейна р. Урал — талые снеговые воды, доля которых достигает 60–80% объема годового водного стока.

В северной части водосбора р. Урал (до г. Оренбурга) высоко развита промышленность, в южной части — наряду с промышленностью развито сельское хозяйство. В промышленном комплексе преобладают электроэнергетика, чер-

ная и цветная металлургия, химическая промышленность, машиностроение и металлообработка при значительном развитии пищевой и легкой отраслей промышленности [6].

На территории бассейна р. Урал расположены крупные промышленные узлы: Магнитогорский в Челябинской области (Магнитогорский металлургический комбинат; ОАО “Магнитстрой”); Оренбургский, Орский и Медногорский в Оренбургской области (Ириклинская ГРЭС — самый крупный промышленный водопользователь; предприятия топливной промышленности — Оренбургнефть, Орскнефтехим, Оренбурггазпромэнерго; предприятия цветной металлургии — комбинат “Южуралникель”) и др. Промышленные зоны локализованы в основном в пределах городов Верхнеуральска (с населением ~9 тыс. чел.), Медногорска (~24 тыс. чел.), Орска (~190 тыс. чел.), Магнитогорска (~410 тыс. чел.), Оренбурга (~540 тыс. чел.). Таким образом, на формирование качества поверхностных вод в бассейне р. Урал влияют организованные сбросы сточных вод с промышленных предприятий, с городских очистных сооружений, ливневой и талый сток населенных пунктов, промышленных зон и сельскохозяйственных объектов [2, 4].

МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В РЕЧНОЙ ВОДЕ

Для исследования многолетних тенденций содержания загрязняющих веществ в речной системе р. Урал сформирована база данных гидрохимического мониторинга на 27 пунктах наблюдений Росгидромета за период с 1986 (в нескольких створах с 1969 г. или 1971 г.) по 2021 г. для различных показателей качества воды. Картосхема расположения гидрохимических постов в бассейне р. Урал приведена на рис. 1.

Проводилась статистическая обработка гидрохимических данных с использованием программы “Гидрохим_ПК”. При построении графиков использовалась программа для работы с электронными таблицами Microsoft Excel. Для описания многолетних тенденций (трендов) различных гидрохимических показателей на исследуемых постах рассчитывались полиномиальные

функции, аппроксимирующие тенденции с наиболее высоким коэффициентом детерминации ($0 < R^2 < 1$) [3]. Чем ближе R^2 к 1, тем меньше влияние случайных факторов на отклонение среднегодовых значений гидрохимических показателей от линии регрессии. Результаты расчетов показали, что для большинства гидрохимических показателей значения R^2 находятся в интервале от 0 до 0.63. По изменению тенденций содержания загрязняющих веществ в речной системе в различные временные интервалы исследуемого многолетнего периода установлены пространственно-временные закономерности изменения качества воды р. Урал.

Тенденции изменения содержания загрязняющих веществ в речной воде

В поверхностные воды **сульфаты** поступают главным образом за счет процессов химического выветривания и растворения серосодержащих минералов, а также окисления сульфидных минералов и серы. Значительные количества сульфатов поступают в водные объекты в процессе отмирания организмов и окисления веществ растительного и животного происхождения, а также с промышленными и бытовыми сточными водами. В среднем за исследуемый многолетний период содержание сульфатов в водах р. Урал повышается от г. Верхнеуральска к г. Магнитогорску (увеличение среднегодовых концентраций от 30–50 до 150 мг/дм³), далее к г. Орску и п. Илек содержание сульфатов снижается. В отдельные годы среднегодовые концентрации превышают норматив для водоемов рыбохозяйственного водопользования (ПДК): незначительно в створе г. Верхнеуральска, существенно (в 2–4 раза) ниже г. Орска. В створах ниже г. Магнитогорска, г. Оренбурга и в створе п. Илек большая часть среднегодовых концентраций > ПДК. На большинстве постов наблюдается тренд снижения содержания сульфатов в исследуемый период к 2002–2012 гг., к концу исследуемого периода (2021 г.) он меняется на тренд увеличения содержания сульфатов в речной воде.

Основные источники **хлоридов** в водных объектах — соленосные отложения; магматические породы, в состав которых входят хлорсодержащие минералы; вулканические выбросы, засо-

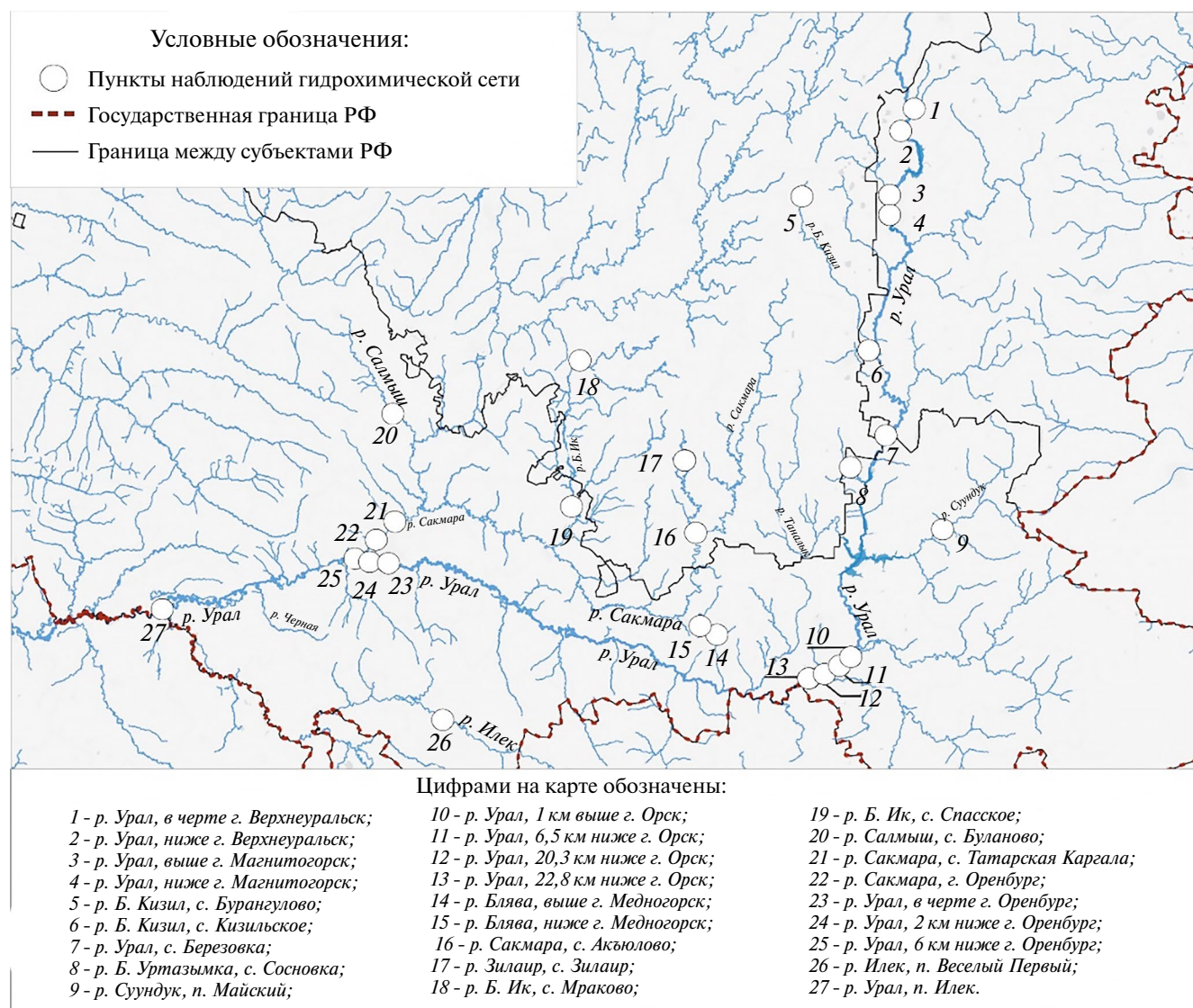


Рис. 1. Картограмма расположения гидрохимических пунктов наблюдений в бассейне р. Урал.

ленные почвы, из которых хлориды вымываются атмосферными осадками. Большие количества хлоридов попадают в водные объекты с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами. В среднем за многолетний период содержание хлоридов в водах р. Урал увеличивается по длине реки до г. Оренбурга, где в период 1982–1985 гг. наблюдаются превышения ПДК. К створу п. Илек среднегодовые концентрации хлоридов снижаются до 100 мг/дм³. Максимальные среднегодовые концентрации хлоридов (300–400 мг/дм³) отмечаются в створах городов Орска и Магнитогорска. За исследуемый период наблюдаются положительные тренды изменения концентраций хлоридов в четырех нижних ство-

рах мониторинга р. Урал, что свидетельствует о росте антропогенной нагрузки на водосбор.

Показатель БПК₅ характеризует загрязнение речных вод органическими соединениями, легко поддающимися биохимическому разложению находящимися в воде микроорганизмами. В течение многолетнего периода на исследуемых постах среднегодовые значения БПК₅ превышали норматив для водоемов рыбохозяйственного водопользования, а измеренные в течение года значения показателя варьируют в широком диапазоне. Максимальные измеренные значения БПК₅ следующие: 14 мг мО₂/дм³ в створе в 1 км ниже г. Верхнеуральска, 12 мг мО₂/дм³ в створе в 18 км

ниже г. Магнитогорска, $11 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ в створе в 1 км ниже г. Орска. К устьевому створу п. Илек среднемноголетняя величина БПК₅ снижается до $3 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, в этом же створе с 1986 г. наблюдается тренд снижения ее среднегодовых значений.

Основные источники поступления **нефтепродуктов** в водные объекты — сточные воды предприятий нефтеперерабатывающей, нефтедобывающей, химической, металлургической и других отраслей промышленности, а также поверхностный сток с городских территорий [1]. Среднегодовые концентрации нефтепродуктов в водотоках р. Урал в последние десятилетия близки к нормативным значениям (0.05 мг/дм^3), однако измеренные в течение года значения могут их превышать в 5–6 раз. В последнее десятилетие отмечается тренд увеличения содержания нефтепродуктов ниже городов Верхнеуральска и Магнитогорска, в нижних по течению створах — тренды снижения.

Основные антропогенные источники **соединений азота** в водных объектах — промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды, смыв азотных удобрений с полей, стоки животноводческих ферм, поверхностный сток селительных территорий. Естественные источники соединений азота — прижизненные выделения гидробионтов, протекающие в водных объектах процессы минерализации органических веществ. Среднемноголетние концентрации азота аммонийного в р. Урал $\leq \text{ПДК}$ и составляют $0.4\text{--}0.5 \text{ мг/дм}^3$, однако измеренные в течение года концентрации достигают $1.5\text{--}2.0 \text{ мг/дм}^3$ в створе в 1 км ниже г. Верхнеуральска, 5 мг/дм^3 в створе в 18 км ниже г. Магнитогорска. В замыкающем створе п. Илек измеренные концентрации менее изменчивы, а среднегодовые значения составляют $\sim 0.4 \text{ мг/дм}^3$ с заметными повышениями в 1990 и 1994 гг. В этом же створе наблюдается тренд снижения концентраций азота аммонийного в речной воде за исследуемый период. Среднемноголетнее содержание азота нитратного наибольшее в двух верхних створах и достигает $\sim 2 \text{ мг/дм}^3$, вниз по течению р. Урал оно незначительно уменьшается. Во всех створах мониторинга внутригодовые изменения концентраций азота нитратного значительны, максимальные концентрации ($5\text{--}10 \text{ мг/дм}^3$) наблюдались в 1990-е гг. За исследуемый период среднегодовые

концентрации азота нитратного не меняются в створе в 18 км ниже г. Магнитогорска, в остальных створах наблюдаются положительные тренды в период 1986–2000 гг. и отрицательные — в последующий период.

Антропогенные источники **фосфатов** в природных водах — стоки с сельскохозяйственных территорий и от населенных пунктов, хозяйственно-бытовые сточные воды, синтетические моющие средства на основе полифосфатов, флотореагентов и др. Среднегодовое содержание фосфатов по длине р. Урал практически не меняется и к концу исследуемого периода близко к ПДК. Лишь в створе ниже г. Магнитогорска среднегодовые концентрации фосфатов повышаются до 0.3 мг/дм^3 и не меняются за многолетний период. В трех нижних створах р. Урал в 1980-х гг. отмечены аналогичные высокие среднегодовые концентрации фосфатов, они снижаются к 2000-м гг. и незначительно повышаются к концу исследуемого периода.

Основные источники загрязнения природных вод металлами — горнодобывающие, металлургические, машиностроительные и химические предприятия, гальванические цеха и др. Повышенное среднегодовое содержание в речных водах **цинка** отмечается в верхнем течении р. Урал (рис. 2а). Ниже городов Орска, Оренбурга и п. Илек среднегодовые концентрации снижаются до нормативных значений (10 мкг/дм^3). Экстремально высокое загрязнение речных вод цинком со среднегодовыми концентрациями $> \text{ПДК}$ в 100 раз (в отдельные годы — 600 ПДК) наблюдается в р. Бляве ниже г. Медногорска. За исследуемый период отмечены положительные тренды среднегодовых концентраций цинка в нижнем течении р. Урал и в р. Бляве.

Высокий уровень загрязнения р. Урал **железом** отмечен в 1980-е гг. — измеренные концентрации достигают $1.7\text{--}2.7 \text{ мг/дм}^3$ ($> \text{ПДК}$ в 17–27 раз). К концу исследуемого периода содержание железа по длине р. Урал снижается до среднегодовых значений 0.1 мг/дм^3 (соответствует ПДК) (рис. 2б).

Загрязнение р. Урал **марганцем** на исследуемых четырех створах (выше и ниже г. Верхне-

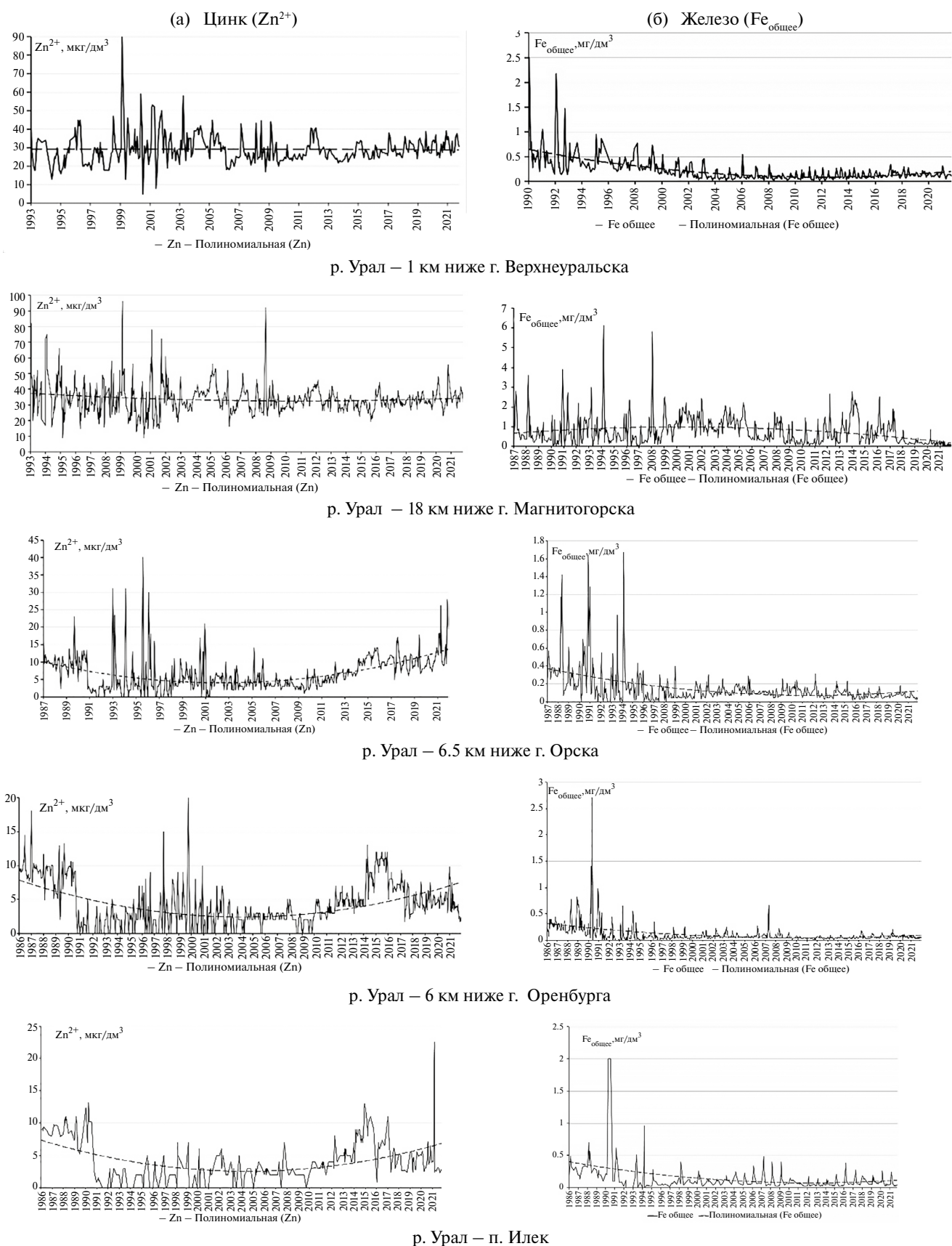
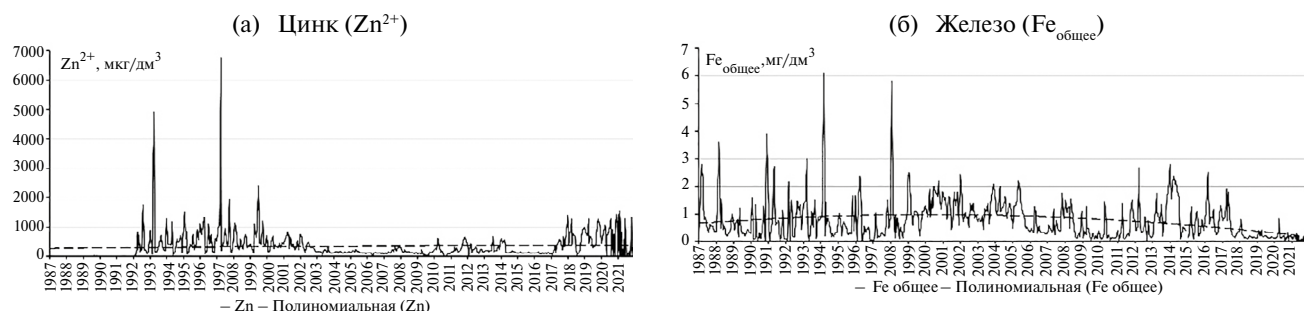


Рис. 2. Многолетняя динамика концентраций цинка (Zn^{2+}) (а) и железа ($Fe_{общее}$) (б) в бассейне р. Урал.



р. Блява — ниже г. Медногорска

Рис. 2. Окончание.

уральска, с 2001 г. выше и ниже г. Магнитогорска) характеризуется среднегодовыми концентрациями ~ 100 мкг/дм³ ($>$ ПДК в 10 раз), измеренные в течение года концентрации достигают 250–350 мкг/дм³ (25–35 ПДК). Наблюдается устойчивая тенденция к снижению содержания марганца в речной сети к концу исследуемого периода до среднегодовых значений ~ 50 мкг/дм³.

Загрязнение р. Урал **никелем** контролируется в четырех створах (в среднем течении и в замыкающем п. Илек). Среднегодовые концентрации никеля в большинстве лет рассматриваемого периода $<$ ПДК, максимальные концентрации в отдельные годы достигают 20–25 мкг/дм³ (2–2.5 ПДК), на р. Бляве ниже г. Медногорска — 70 мкг/дм³. В последнее десятилетие отмечается тенденция к снижению среднегодовых концентраций никеля до 3 мкг/дм³.

В большинстве створов мониторинга р. Урал среднегодовые концентрации **меди** $>$ ПДК в исследуемый период. В отдельные годы измеренные концентрации достигают 8–9 мкг/дм³ (до 9 ПДК), в створе ниже г. Орска — до 20 мкг/дм³ (20 ПДК), в р. Блява ниже г. Медногорска максимальные концентрации — 800–1200 мкг/дм³ (800–1200 ПДК). В последнее десятилетие наблюдается тенденция увеличения среднегодовых концентраций меди в р. Урал.

ВЛИЯНИЕ МЕЖГОДОВЫХ И ВНУТРИГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОСТИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И КАЧЕСТВО РЕЧНОЙ ВОДЫ

Влияние изменений водности на качество речных вод в бассейне р. Урал исследовалось на 14 створах мониторинга Росгидромета (табл. 1,

Таблица 1. Сведения об исследуемых створах Росгидромета в бассейне р. Урал

Местоположение	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²
р. Урал — г. Верхнеуральск	2274	2650
р. Урал — с. Березовка	1930	22600
р. Урал — г. Оренбург	1296	82300
Правобережные притоки		
р. Большой Кизил — с. Бурангулово	156	212
р. Большая Уртазымка — с. Сосновка	11	1460
р. Блява — г. Медногорск	14	216
р. Сакмара — с. Акъюлово	474	4420
р. Сакмара — с. Татарская Каргала	32	29600
р. Зилаир — с. Зилаир	99	334
р. Большой Ик — с. Мраково	208	1870
р. Большой Ик — с. Спасское	54	6490
р. Салмыш — с. Буланово	79	2580
Левобережные притоки		
р. Суундук — пос. Майский	69	4020
р. Илек — пос. Веселый Первый	297	17200

рис. 1) за период 1986–2021 гг. На графиках многолетней динамики речного стока (рис. 3) отмечено чередование лет разной водности, которые зачастую группируются в циклы повышенной или пониженной водности разной продолжительности. В последние годы на многих реках в бассейне р. Урал наблюдается длительный период маловодных лет, что особенно заметно на таких притоках, как р. Большой Ик (с. Спасское), где маловодный период начался с 2004 г. (рис. 3б), и р. Бляве (г. Медногорск), где период пониженной водности длится с 1999 г. (рис. 3в).

Результаты расчетов межгодовых изменений водности рек показывают, что за исследуемый период в створах, расположенных на р. Урал, кратность превышения стока многоводного года над стоком маловодного года варьирует в диапазоне 8–12, при этом разница межгодовых изменений водности снижается вниз по течению реки. В створах, расположенных на притоках р. Урал, превышение стока многоводного года над стоком маловодного года варьирует в значительно более широком диапазоне: от 3 (р. Салмыш – с. Буланово) до 38 (р. Блява – г. Медногорск) раз.

Закономерности межгодовых и внутригодовых изменений водности рек в бассейне р. Урал

Для установления **закономерностей межгодовых изменений речного стока** определялась категория водности каждого года (маловодный, средний по водности или многоводный) из рассматриваемого многолетнего периода. За каждый год рассчитывались модульные коэффициенты $K_{\text{ср}}$, определенные как отношение объема годового водного стока к средней многолетней его величине. В соответствии с [3], к многоводным отнесены годы со значениями модульных коэффициентов $K_{\text{ср}} > 1.05$, к маловодным – $K_{\text{ср}} < 0.95$, к средним по водности – $1.05 \geq K_{\text{ср}} \geq 0.95$.

В результате ранжирования лет по водности (табл. 2) установлено, что за анализируемый 35-летний период преобладают маловодные годы, доля которых в исследуемых створах составляет в среднем ~54%. Максимальное количество маловодных лет (21) отмечается в створах р. Урал – г. Оренбург, р. Сакмара – с. Акьюлово

и р. Суундук – пос. Майский. Минимальное количество маловодных лет (16) отмечается в створах р. Сакмара – с. Татарская Каргала и р. Большой Ик – с. Спасское. Для большинства рек бассейна маловодные – 1992, 1995, 1996, 1999, 2008–2012, 2015, 2018 и 2019 гг.

Для исследуемых створов доля многоводных лет составляет в среднем ~38%. Наибольшее количество многоводных лет за анализируемый период варьирует от 9 (р. Зилаир – с. Зилаир) до 17 (р. Салмыш – с. Буланово). На большинстве рек бассейна р. Урал к многоводным относятся 1987, 1990, 1993, 1994, 2000, 2002 и 2007 гг. Доля средних по водности лет существенно меньше – ≤8%. Для большинства рек бассейна средние по водности – 1986, 1988, 1989, 1991, 1997, 2001, 2003, 2004, 2005, 2014, 2016, 2017, 2020 гг.

Для выявления **закономерностей внутригодовых изменений водности рек бассейна** рассчитывались объемы водного стока за разные сезоны года: весну (март–май), лето–осень (июнь–ноябрь), зиму (декабрь–февраль). Результаты расчетов за исследуемый период показывают, что в годовом стоке рек существенно преобладает весенний сток, его доля в годовом стоке в створах на р. Урал составляет в среднем ~63%; в створах на притоках р. Урал доля варьирует от 69 (правобережные притоки) до 75% (левобережные притоки). Максимальная доля весеннего стока – на реках Большая Уртазымка (с. Сосновка) и р. Суундук (пос. Майский) и >83%.

Доля летне-осеннего стока в створах на р. Урал составляет в среднем ~29%; в створах на притоках р. Урал – от 20 (левобережные притоки) до 25% (правобережные притоки). Зимний сток существенно меньше летнего. Доля зимнего стока составляет 2–10% годового водного стока.

Изменения химического состава и качества речной воды в годы разной водности

Для исследования влияния межгодовых изменений водности на содержание в речной воде гидрохимических компонентов сравнивались среднемноголетние их концентрации в годы разных категорий водности (табл. 3). Результаты расчетов показали следующее.

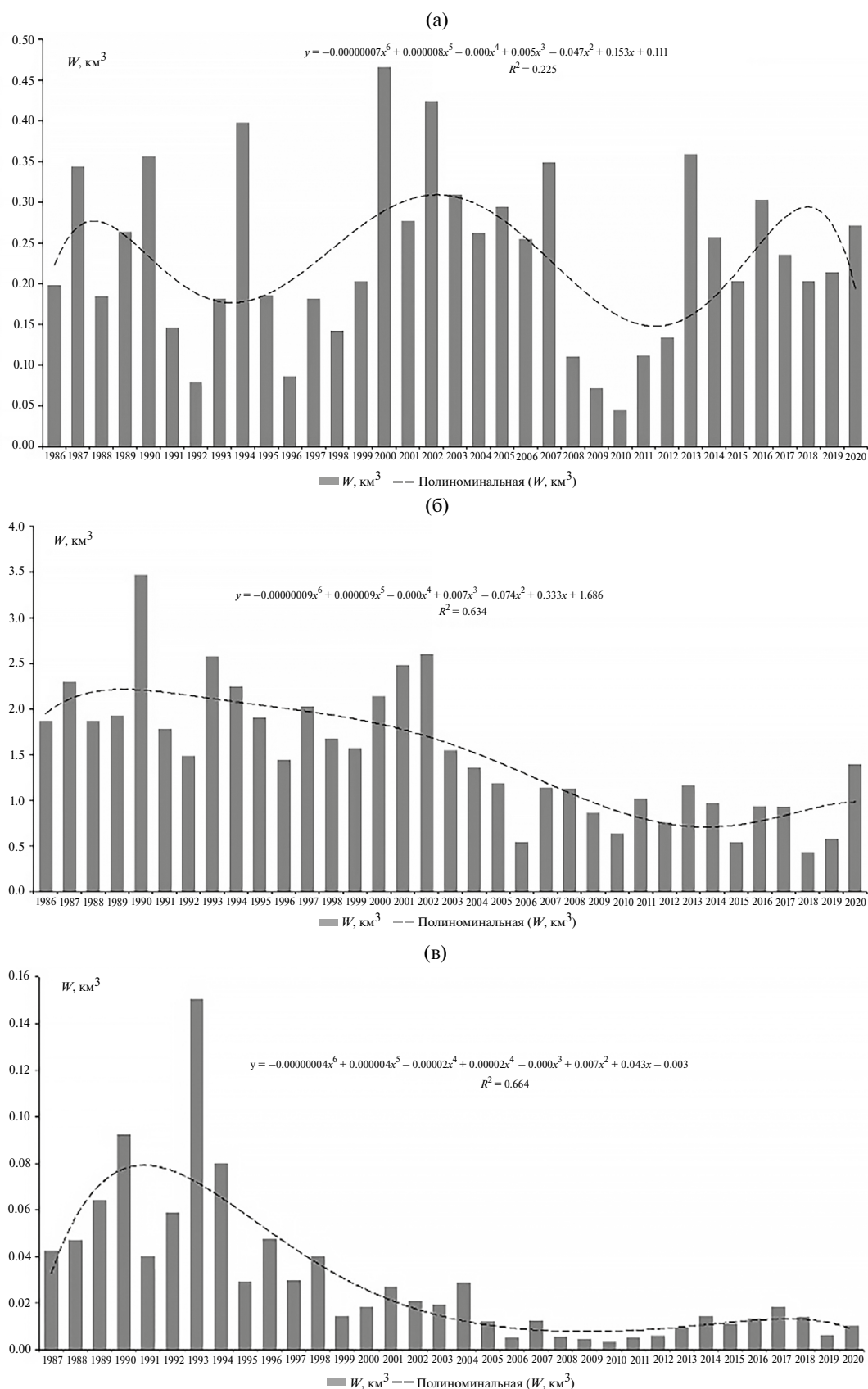


Рис. 3. Многолетние изменения объемов годового водного стока рек в бассейне р. Урал: (а) р. Урал – г. Верхне-уральск; (б) р. Большой Ик – с. Спасское; (в) р. Блява – г. Медногорск.

Таблица 2. Результаты определения количества разных по водности лет в створах Росгидромета в бассейне р. Урал за 1986–2020 гг.

Река – пост	Количество лет разной водности		
	многоводные	маловодные	средние по водности
р. Урал – г. Верхнеуральск	16	18	1
р. Урал – с. Березовка	11	20	4
р. Урал – г. Оренбург	11	21	3
Правобережные притоки			
р. Большой Кизил – с. Бурангулово	14	19	2
р. Большая Уртазымка – с. Сосновка	14	18	3
р. Блява – г. Медногорск	10	20	4
р. Сакмара – с. Акъюлово	12	21	2
р. Сакмара – с. Татарская Каргала	16	16	3
р. Зилаир – с. Зилаир	9	17	5
р. Большой Ик – с. Мраково	13	19	3
р. Большой Ик – с. Спасское	15	16	4
р. Салмыш – с. Буланово	17	17	1
Левобережные притоки			
р. Суундук – пос. Майский	13	21	1
р. Илек – пос. Веселый Первый	15	19	1

На подавляющем большинстве створов максимальные среднемноголетние концентрации **растворенного кислорода** наблюдаются в многоводные и средние по водности годы. Лишь в двух створах (р. Большая Уртазымка – с. Сосновка и р. Салмыш – с. Буланово) отмечается незначительное (статистически незначимое) увеличение среднемноголетней концентрации кислорода в маловодные годы. Таким образом, содержание в речных водах кислорода повышается с увеличением водности года. В целом за исследуемый период кислородный режим рек в бассейне р. Урал благоприятный. Среднегодовые концентрации растворенного кислорода не опускаются ниже установленного норматива для водоемов рыбохозяйственного водопользования и варьируют от 7.99 (р. Урал – г. Верхнеуральск) до 11.6 мг/дм³ (р. Зилаир – с. Зилаир).

Наибольшие среднемноголетние концентрации **хлоридов** в 1/2 исследуемых створов и концентрации **сульфатов** в 1/3 створов отмечены в маловодные годы, что в естественных природных условиях связано с увеличением доли высокоминерализованных грунтовых вод в питании рек в маловодные годы. В остальных створах наибольшие среднемноголетние концентрации хлоридов и сульфатов наблюдаются в многоводные или средние по водности годы (табл. 3). Та-

кое нехарактерное для природных водных объектов увеличение содержания в них хлоридов и сульфатов в средние и многоводные годы может свидетельствовать о дополнительных источниках минеральных веществ антропогенного происхождения, в частности – о сбросах сточных вод. Например, в створах р. Урал – с. Березовка, р. Большой Кизил – с. Бурангулово, р. Большой Ик – с. Спасское в многоводные годы отмечены максимальные среднемноголетние концентрации и хлоридов, и сульфатов. На половине исследуемых створов среднемноголетние концентрации сульфатов >ПДК в годы всех категорий водности, в остальных створах – в маловодные или многоводные годы.

Максимальное превышение ПДК (в 3.2 раза) отмечено в створе р. Блява – г. Медногорск в маловодные годы. Среднемноголетние концентрации хлоридов ≤ ПДК ни в одном створе.

Наибольшими среднемноголетними концентрациями органических веществ, оцениваемых по показателю **ХПК**, характеризуются разные по водности годы: в 1/3 створов – многоводные, в 1/3 створов – средние, в 1/3 – маловодные (табл. 3). Такое несовпадение изменений величины ХПК и водности года в исследуемых створах может быть связано с особенностями хозяйствен-

Таблица 3. Среднегоголетние значения показателей качества воды рек бассейна р. Урал в годы разной водности (полужирный шрифт – наибольшие концентрации среди трех категорий водности, н/о – не определялось)

Водность года	р. Урал			р. Большой Кизил - с. Бурангулово	р. Большая Уртазымка - с. Сосновка	р. Суундук - пос. Майский	р. Сакмара - с. Татарская Каргала	р. Зилаир - с. Зилаир	р. Большой Ик - с. Спасское	р. Салмыш - с. Буланово	р. Илек - пос. Веселый	р. Бьява - г. Медногорск
	г. Верхнеуральск	с. Березовка	г. Оренбург									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Растворенный кислород, мг/дм ³												
Маловодный	7.99	9.38	10.1	9.90	9.88*	9.80	9.72	9.76	9.39	9.88	9.80	10.0
Средней водности	9.96	9.87	10.9	10.0	9.50	9.41	11.0	11.0	9.89	9.40	9.68	10.4
Многоводный	10.2	10.0	9.64	9.43	9.37	10.4	10.5	11.6	9.55	9.46	10.3	11.2
Сульфаты, мг/дм ³												
Маловодный	65.7	135	110	18.4	124	99.4	102	14.0	69.1	197	168	323
Средней водности	59.7	73.4	112	23.9	88.1	48.7	158	3.30	41.1	105	112	247
Многоводный	39.6	154	105	39.6	94.4	151	120	10.5	165	200	183	202
Хлориды, мг/дм ³												
Маловодный	15.3	101	107	6.87	145	144	73.7	3.73	26.9	60.2		66.6
Средней водности	10.0	54.5	67.9	4.63	96.3	95.6	57.9	7.60	30.7	33.7	н/о**	99.9
Многоводный	14.5	655	80.6	8.77	88.0	82.8	51.9	6.91	31.3	44.9		76.8
ХПК, мгО/дм ³												
Маловодный	27.7	21.1	28.5	19.5	28.9	25.9	27.2	17.3	17.7	21.7	30.2	33.9
Средней водности	25.2	22.4	23.6	18.7	27.1	28.8	41.0	13.1	14.5	19.3	34.9	37.0
Многоводный	18.5	27.2	30.6	9.90	23.8	25.2	22.3	13.8	32.5	22.4	21.9	32.1
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³												
Маловодный	2.35	2.62	2.37		2.47	2.11	2.38		2.12	2.28	2.46	2.53
Средней водности	1.76	2.76	3.17	н/о	2.69	1.99	3.07	н/о	2.61	2.62	2.98	3.96
Многоводный	1.35	3.17	2.85		2.68	3.20	3.23		3.09	3.06	2.84	3.52
Азот нитритный, мг/дм ³												
Маловодный	0.046	0.024	0.012	0.031	0.016	0.022	0.031	0.007	0.029	0.016	0.025	0.110
Средней водности	0.015	0.028	0.069	0.097	0.031	0.037	0.056	0.017	0.043	0.043	0.047	0.049
Многоводный	0.014	0.080	0.040	0.019	0.039	0.043	0.036	0.003	0.059	0.038	0.117	0.274
Азот нитратный, мг/дм ³												
Маловодный	1.96	0.72	0.29	1.26	0.17	0.75	0.19	1.17	1.26	0.19	0.27	0.39
Средней водности	0.94	1.09	1.31	1.64	1.21	0.99	0.20	0.63	1.27	1.25	0.30	1.40
Многоводный	1.95	1.40	0.89	0.85	1.34	0.75	1.33	1.03	1.04	0.14	0.70	1.82

Таблица 3. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Азот аммонийный, мг/дм³												
Маловодный	0.42	0.30	0.18	0.33	0.08	0.29	0.19	0.22	0.31	0.25	1.03	1.96
Средней водности	0.29	0.28	0.54	0.51	0.49	0.31	0.21	0.54	0.25	0.31	0.16	1.19
Многоводный	0.30	0.38	0.31	0.43	0.80	0.81	1.10	0.29	0.78	0.16	0.79	1.34
Фосфаты, мг/дм³												
Маловодный	0.049	0.100	0.056	0.011	0.018	0.040	0.067	0.007	0.028	0.079	0.272	0.158
Средней водности	0.037	0.041	0.048	0.007	0.042	0.041	0.113	0.014	0.037	0.043	0.113	0.161
Многоводный	0.033	0.078	0.065	0.005	0.027	0.045	0.084	0.021	0.072	0.151	0.179	0.129
Железо общее, мг/дм³												
Маловодный	0.10	0.07	0.10	0.38	0.08	0.12	0.09	0.53	0.06	0.09	0.07	0.21
Средней водности	0.18	0.08	0.12	1.33	0.08	0.07	0.43	0.61	0.15	0.12	0.47	0.41
Многоводный	0.18	0.16	0.17	0.21	0.21	0.28	1.03	0.41	0.31	0.25	0.15	1.00
Цинк, мкг/дм³												
Маловодный	24.8	4.36	4.91	3.31	8.11	4.64	3.59	2.83	4.00	4.37	4.99	751
Средней водности	29.0	7.00	1.85	43.8	3.50	6.83	8.08	1.97	2.00	2.17	9.25	1099
Многоводный	29.8	8.92	1.09	13.2	6.33	9.13	9.60	4.83	7.63	9.15	7.17	521
Медь, мкг/дм³												
Маловодный	1.33	1.27	2.78	4.01	3.74	1.70	2.67	3.06	1.87	3.11	2.24	76.3
Средней водности	2.27	0.62	0.00	18.3	2.00	1.83	2.92	9.90	0.83	0.83	2.93	176
Многоводный	2.75	1.54	0.67	4.24	0.33	3.48	3.67	5.21	2.88	3.02	2.33	187
Хром шестивалентный, мкг/дм³												
Маловодный		н/о	2.05	н/о	1.47	1.55	2.05	н/о	1.03	1.35	12.0	3.33
Средней водности	н/о		0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	
Многоводные			0.35	0.00	0.00	0.37		1.50	0.00	9.00	0.00	
Никель, мкг/дм³												
Маловодный		3.27	3.58		4.87	2.72	2.47		1.38	3.83	3.10	18.4
Средней водности	н/о	4.00	9.62	н/о	6.83	2.33	6.42	н/о	3.50	10.3	4.38	10.9
Многоводные		3.46	1.95		5.67	4.35	5.98		6.50	1.85	7.50	18.8
Нефтепродукты, мг/дм³												
Маловодный	0.13	0.04	0.05	0.08	0.05	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
Средней водности	0.09	0.02	0.06	0.37	0.04	0.07	0.06	0.22	0.06	0.07	0.07	0.09
Многоводные	0.05	0.09	0.05	0.57	0.02	0.08	0.11	0.14	0.06	0.08	0.32	0.21
Фенолы, мг/дм³												
Маловодный	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Средней водности	0.000	0.000	0.000	0.0032	0.000	0.000	0.0020	0.0014	0.000	0.000	0.0015	0.000
Многоводные	0.000	0.0013	0.0004	0.000	0.000	0.0003	0.0005	0.0037	0.0003	0.0017	0.000	0.0003

ной деятельности и с преобладанием разных типов источников органических веществ (диффузных или точечных) на различных участках речной сети. Наименьшие среднееголетние значения ХПК отмечаются в многоводные и средние по водности годы, что может быть связано с процессами разбавления и снижения концентраций органических веществ с увеличением водности водотоков. Лишь в створе р. Урал — с. Березовка значение ХПК минимально в маловодные годы и повышается с увеличением водности года, что показывает наличие на данном участке водосбора диффузных источников загрязнения речных вод.

В подавляющем большинстве исследуемых створов в годы всех категорий водности среднееголетние значения ХПК > ПДК и в створе р. Сакмара — с. Татарская Каргала достигают 2.7 ПДК.

Максимальные среднееголетние концентрации органических веществ, оцениваемых по показателю БПК₅, отмечены в многоводные и средние по водности годы, что указывает на поступление легкоокисляемых органических веществ в речную сеть в результате их диффузного смыва с водосбора. Лишь в одном створе (р. Урал — г. Верхнеуральск) среднееголетнее значение БПК₅ максимально в маловодные годы, что может быть результатом загрязнения речных вод на данном участке точечным источником (например, в результате сброса хозяйственно-бытовых сточных вод). На подавляющем большинстве исследуемых створов в годы всех категорий водности среднееголетние значения БПК₅ незначительно > ПДК и в створе р. Блява — г. Медногорск достигают максимума — 1.9 ПДК (табл. 3).

Среднееголетние концентрации **нефтепродуктов и фенолов** на большинстве исследуемых створов максимальны в многоводные и средние по водности годы и превышают ПДК: нефтепродуктов — до 11.4 раз (в створе р. Большой Кизил — с. Бурангулово), фенолов — до 4 раз (в створе р. Зилаир — с. Зилаир). Преимущественно в многоводные годы анализируемого периода регистрируются случаи высокого и экстремально высокого загрязнения речных вод нефтепродуктами, что свидетельствует об

их поступлении в речную сеть в основном от диффузных источников. Лишь в двух створах (р. Урал — г. Верхнеуральск и р. Большая Ур-тазымка — с. Сосновка) среднееголетняя концентрация нефтепродуктов максимальна в маловодные годы и снижается с увеличением водности года, что может быть связано с точечными источниками загрязнения на данных участках водосбора.

Содержание **соединений азота** в речных водах почти во всех створах наибольшее в многоводные и средние по водности годы, что указывает на их преимущественное поступление в водный объект в результате смыва с водосборной территории. Лишь в нескольких створах максимальные концентрации биогенов отмечены в маловодные годы: азота нитритного — в одном, азота нитратного — в двух, азота аммонийного — в трех створах. Например, в створе р. Урал — г. Верхнеуральск в маловодные годы среднееголетние концентрации всех видов азота максимальны, что дополнительно свидетельствует о загрязнении реки на этом участке сточными водами от точечного источника: повышенное содержание азота аммонийного и нитритного указывает на свежее загрязнение реки, повышенное содержание азота нитратного — на загрязнение в предшествующее время.

Среднееголетнее содержание азота аммонийного > ПДК в исследуемых створах в годы разных категорий водности. Максимальное превышение (4.9 ПДК) наблюдается в маловодные годы в створе р. Блява — г. Медногорск. Содержание азота нитритного > ПДК на подавляющем большинстве постов и происходит в основном в многоводные или средние по водности годы (наибольшее превышение (13.7 ПДК) — в створе р. Блява — г. Медногорск). Лишь на одном посту (р. Урал — г. Верхнеуральск) ПДК превышает (2.3 ПДК) в маловодные годы. Среднееголетние концентрации азота нитратного не превышают ПДК ни на одном из постов.

Содержание **железа общего** в водотоках бассейна р. Урал повышается с увеличением водности года и на большинстве исследуемых постов максимально в многоводные годы (на нескольких постах — в средние по водности годы), что связано с его поверхностным смывом с водосбора.

Концентрации **цинка и меди** в речной сети также повышаются в многоводные и средние по водности годы, и лишь на двух постах (р. Урал — г. Оренбург и р. Большая Уртазымка — с. Сосновка) они максимальны в маловодные годы. Существенное увеличение среднемноголетних концентраций металлов в средние по водности годы относительно лет других категорий водности, как, например, на посту р. Большой Кизил — с. Бурангулово (цинка в 13 раз, железа в 6.2 и меди в 4.6 раза), может быть связано с особенностями геологического строения и с расположением хозяйственных объектов — источников загрязнения в пределах водосбора.

В годы тех же категорий водности, когда на исследуемых постах наблюдаются наибольшие концентрации металлов, отмечены и максимальные превышения ПДК: на посту р. Блява — г. Медногорск — 110 ПДК цинка (в средние по водности годы) и 187 ПДК меди (в многоводные годы), на посту р. Большой Кизил — с. Бурангулово — 13.3 ПДК железа (в многоводные годы).

Изменения химического состава и качества речной воды в разные сезоны года

Для выявления закономерностей внутригодовых (сезонных) изменений качества речных вод в бассейне р. Урал исследовались зависимости между измеренными концентрациями разных гидрохимических компонентов и расходами на дату отбора пробы воды. Для подтверждения или опровержения наличия связи между гидрохимической и гидрологической характеристиками методом корреляционного анализа подбирались уравнения, аппроксимирующие зависимости с наиболее высоким (из возможных для разных типов связи) индексом корреляции. Теснота связи оценивалась по величине индекса корреляции R^2 в соответствии со шкалой Чеддока, согласно которой корреляция очень слабая при $R^2 < 0.30$, слабая при $0.30 \leq R^2 < 0.50$, средняя (умеренная) при $0.50 \leq R^2 < 0.70$, высокая при $0.70 \leq R^2 < 0.90$ и очень высокая при $0.90 \leq R^2 < 1.0$. Результаты расчетов показали следующее.

В большинстве случаев зависимостей между расходами воды и концентрациями гидрохимических компонентов на исследуемых постах

в бассейне р. Урал не установлено либо зависимости очень слабые. Около 10% зависимостей относятся к категории слабые, в основном это зависимости между расходами воды и общей минерализацией, содержанием сульфатов, хлоридов, азота нитратного, железа общего, никеля. Лишь одна зависимость между расходом и общей минерализацией воды в створе р. Салмыш — с. Буланово оценивается как средняя ($R^2 = 0.57$).

Такая низкая теснота связи между содержанием в речной воде гидрохимических компонентов и водным стоком — одним из главных факторов, формирующим химический состав водотоков в естественных природных условиях, — может указывать на то, что на качество речных вод большое влияние оказывает значительная хозяйственная освоенность водосборной территории. Отсутствие внутригодовых изменений содержания гидрохимических компонентов в соответствии с изменением расходов воды и со сменой источников питания рек в разные фазы водного режима может свидетельствовать о значительном дополнительном поступлении в водные объекты химических веществ — компонентов сточных вод от точечных и диффузных антропогенных источников, сглаживающем сезонные различия химического состава речных вод, характерные для естественных водотоков, или приводящем к максимальным и минимальным концентрациям в те фазы водного режима, когда в естественных водотоках наблюдаются минимумы и максимумы концентраций.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ данных многолетнего мониторинга Росгидромета в бассейне р. Урал на 27 гидрохимических постах за период с 1986 (в нескольких створах — с 1969) по 2021 г. Для установления многолетних тенденций использовался метод регрессионного анализа. Результаты расчетов показали, что зависимость содержания в речных водах различных загрязняющих веществ от времени аппроксимируется полиномиальной функцией с коэффициентами детерминации $0 < R^2 < 0.63$.

Анализ многолетних тенденций (трендов) в рядах гидрохимических характеристик выявил следующие закономерности:

— от верхнего створа г. Верхнеуральска к устьевому створу п. Илек значения показателя БПК₅, концентрации сульфатов, хлоридов, аммонийного и нитратного азота, железа, цинка, фосфатов, нефтепродуктов в целом снижаются, однако ниже г. Магнитогорска наблюдается увеличение содержания отдельных загрязнителей;

— наиболее высокие значения практически всех показателей наблюдались в конце 1980-х гг.;

— в большинстве створов мониторинга р. Урал среднегодовые концентрации металлов (меди, марганца, железа) > ПДК, максимальные измеренные значения в отдельные годы > ПДК в десятки раз;

— наиболее загрязненный практически по всем показателям качества воды — створ ниже г. Медногорска на р. Бляве.

Исследована межгодовая и внутригодовая динамика речного стока за период 1986–2020 гг. Установлено, что в анализируемый период кратность превышения стока многоводного года над стоком маловодного на постах в бассейне р. Урал варьировала в диапазоне 3–38 раз. Во внутригодовом распределении стока рек бассейна р. Урал преобладает весенний сток, доля которого варьировала в диапазоне 63–75% годового стока.

Установлено, что однозначной связи увеличения или уменьшения загрязненности речных вод в бассейне р. Урал с увеличением или снижением водности года не существует. Особенности разных гидрохимических компонентов, специфика хозяйственной деятельности и преобладание определенных типов источников загрязняющих веществ (диффузных или точечных) на разных участках речной сети приводят к тому, что повышенный (или пониженный) уровень загрязнения речных вод может формироваться в годы всех категорий водности. Например, в многоводные и средние по водности годы повышается содержание в речной воде легкоокисляемых органических веществ, оцениваемых по показателю БПК₅, азота аммонийного, нитритного и нитратного, нефтепродуктов и фенолов, железа, меди и цинка, что связано с их

поступлением в водные объекты в результате диффузного смыва с водосборной территории. В маловодные годы повышается доля подземного высокоминерализованного питания водных объектов и увеличивается содержание в речных водах сульфатов, хлоридов, хрома (VI). Однако среди исследуемых створов выявлены такие, в которых различно изменение загрязненности речных вод в связи с повышением или снижением водности. Например, в створе р. Урал — г. Верхнеуральск среднесезонные БПК₅ и концентрации азота аммонийного, нитритного, нитратного, фосфатов, нефтепродуктов максимальны в маловодные годы, что указывает на загрязнение этого участка речной сети сточными водами, в том числе хозяйственно-бытовыми. В створе р. Большая Уртазымка — с. Сосновка содержание в речных водах цинка и меди максимально в маловодные годы, на постах р. Большой Кизил — с. Бурангулово и р. Блява — г. Медногорск в средние по водности годы, что может быть связано с особенностями геологического строения и расположением хозяйственных объектов в пределах водосбора.

Выявлено, что в подавляющем большинстве створов мониторинга р. Урал отсутствуют либо статистически незначимы зависимости между сезонными изменениями водного стока и содержанием в водотоках загрязняющих веществ. Подобные изменения гидрохимического режима (отсутствие разницы содержания загрязняющих веществ в разные фазы водного режима) могут указывать на подчиненность природных факторов формирования качества воды антропогенным вследствие значительной хозяйственной освоенности водосбора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: 2020. 510 с.
2. Козлова М.А., Сивохин Ж.Т. Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна реки Урал // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 107–119.
3. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 185 с.

4. Минаев Э.Ф., Фатхутдинова Р.Ш. Интегральная оценка экологического состояния водных объектов бассейна реки Урал (в пределах Российской Федерации) // SCIENCE TIME. 2016. № 1 (25). С. 315–322.
5. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: РИАЛ, 2021. 190 с.
6. Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М. Современные тенденции внутригодового распределения речного стока в бассейне реки Урал // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 112–123.
7. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Урал (Российская часть). Кн. 1. Общая характеристика водного бассейна. Волгоград: Нижне-Волжское БВУ, 2014. 274 с.
8. Чибилев А.А., Вельмовский П.В. Разработка матрицы ландшафтно-восстановительных мероприятий в бассейне трансграничной р. Урал // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. С. 197–205.
9. Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G., Kortunova K.V. Modeling the Genetic Components of the Water and Chemical Runoff of Heavy Metals in the Basin of the Nizhnekamskoe Reservoir // Water Resour. 2023. V. 50. № 4. P. 583–599.
10. Fashchevskaya T.B., Motovilov Y.G., Shadiyanova N.B. Space and Time Regularities in Variations of Nitrogen Compound Concentrations in Watercourses of the Republic of Bashkortostan // Water Resour. 2017. V. 44. № 1. P. 101–111.

SPATIAL AND TEMPORAL CHANGES IN THE WATER QUALITY OF THE URAL RIVER ACCORDING TO LONG-TERM DATA FROM THE STATE MONITORING NETWORK

N. V. Kirpichnikova^{a,*}, M. M. Trofimchuk^b, M. Yu. Kondakova^b, O. L. Romanyuk^b,
T. B. Fashchevskaya^a

119333, Moscow, st. Gubkina, 3
344090, Rostov-on-Don, pr. Stachki, 198

*e-mail: nkirp@list.ru

According to the long-term data of hydrochemical monitoring of Roshydromet, the spatial and temporal patterns of changes in the water quality of the Ural River have been established. Trends in the content of various pollutants in river water over the period 1986–2021 have been revealed. The impact of interannual and intraannual dynamics of water runoff on water quality has been assessed. It has been established that there is no unambiguous dependence of river water pollution on the water content or season of the year in the Ural River basin. It is shown that the level of pollution of river waters in both high-water and low-water periods is significantly influenced by point and diffuse sources of pollution located in different sections of the river network.

Keywords: river basin, hydrochemical monitoring, point and diffuse sources of pollution, long-term trends in water quality, the influence of water content on the formation of water quality.