



ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Журнал освещает теоретические и прикладные проблемы изучения природных вод: формирование водных ресурсов и управление ими, динамику водной среды, качество и охрану вод, гидрохимические и гидроэкологические процессы в водных объектах.



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 51, номер 5, 2024

Гидроэкологическое состояние бассейна р. Урал и возможность устойчивого управления его водными ресурсами

Водопотребление и водоотведение в российской части трансграничной реки Урал:
тренды, влияние на качество воды

А. П. Демин 537

Оценка существующих и перспективных потребностей в речной воде
на казахстанском участке р. Урал

Д. В. Магрицкий 550

Особенности обеспечения водными ресурсами сельскохозяйственного водоснабжения
в изменяющихся климатических условиях бассейна р. Урал

С. Д. Исаева, Э. Б. Дедова 569

Регулирование стока реки Урал в современных и прогнозируемых климатических условиях

*А. С. Калугин, В. В. Чуканов, Ю. Г. Мотовилов, А. В. Мاستрюкова,
Н. О. Попова, Н. Н. Чернобровкин* 583

Опасные и неблагоприятные гидрологические явления для российской части
бассейна реки Урал

Л. С. Курочкина, Е. Н. Грек, Т. В. Скороспехова, С. С. Чепикова 596

Численная гидродинамическая модель протяженного участка р. Урал и ее применение
для оценки рисков затопления селитебных территорий наводнениями и волнами прорыва

В. В. Беликов, Н. М. Борисова, Е. С. Васильева, А. В. Глотко, Т. А. Фёдорова 608

Исследование экологического состояния водных объектов бассейна р. Урал
и меры по его улучшению

Г. С. Ермакова, И. Ю. Милютин, А. А. Строков, Г. Ш. Турсунова, И. В. Землянов 619

Комплексный анализ факторов антропогенной трансформации водосборной
территории реки Урал

Ж. Т. Сивохин, В. М. Павлейчик, А. А. Чибилёв 638

Особенности формирования и изменчивости гидролого-экологических характеристик
малых рек бассейна р. Урал в условиях влияния совокупности естественных
и антропогенных факторов

А. М. Гареев, Д. И. Ахмедьянов, Ю. В. Островская, А. М. Шевченко 647

Методические положения оптимального зарегулирования стока малых рек бассейна
р. Урал водохранилищами с учетом эколого-экономических критериев

А. М. Гареев, В. С. Горячев 659

Пространственные и временные изменения качества воды р. Урал по многолетним
данным государственной сети мониторинга

*Н. В. Кирпичникова, М. М. Трофимчук, М. Ю. Кондакова, О. Л. Романюк,
Т. Б. Фатеева* 666

Модель для оценки контроля и управления качеством воды на трансграничных
водных объектах

О. М. Розенталь, В. О. Полянин, Т. Н. Синцова 681

Многолетняя динамика эколого-гидрологических параметров функционирования
нерестилищ осетровых в среднем течении реки Урал

А. А. Чибилёв, Ж. Т. Сивохин, Ю. А. Падалко, В. М. Павлейчик 693

Гидробиологическая характеристика различных участков бассейна реки Урал
на территории Российской Федерации

*С. В. Яковлев, В. О. Полянин, В. С. Болдырев, Т. Б. Голоколенова,
Ю. В. Баско, Л. А. Черешнева* 705

ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ И ВОДООТВЕДЕНИЕ В РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ТРАНСГРАНИЧНОЙ РЕКИ УРАЛ: ТРЕНДЫ, ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ВОДЫ¹

© 2024 г. А. П. Демин*

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

**e-mail: deminar@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.01.2024 г.

После доработки 21.03.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Показаны изменения объемов водопотребления и водоотведения, массы сброса загрязняющих веществ в российской части бассейна в связи с изменяющимися социально-экономическими и технологическими условиями и оценена трансформация качества воды в р. Урал. Выявлено, что с 1990 по 2022 г. забор воды в российской части бассейна р. Урал для удовлетворения нужд населения и хозяйства сократился в 3.9 раза. Среднесуточное удельное водопотребление на 1 жителя снизилось во всех регионах. Коэффициент водооборота в бассейне вырос с 70.3 до 91.6%. Масса сброса большинства загрязняющих веществ, содержащихся в составе сточных вод, снизилась в 3–20 раз, но по пяти веществам отмечается заметный рост сброса. В верховьях р. Урал за 2008–2020 гг. качество воды по удельной величине комбинаторного индекса загрязненности воды практически не изменилось, в среднем течении наблюдается улучшение качества воды.

Ключевые слова: забор воды, оборотное водоснабжение, среднесуточное удельное водопотребление, орошение земель, сточные воды, сброс загрязняющих веществ, качество воды.

DOI: 10.31857/S0321059624050019 **EDN:** VYFDTE

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы водопользования приобретают все большую актуальность в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов, особенно в регионах с развитым промышленным и сельскохозяйственным производством. Такое сочетание характерно для бассейна трансграничной р. Урал, территория которого относится к регионам с высоким природно-ресурсным потенциалом и интенсивным аграрно-промышленным развитием [33]. На территории бассейна размещаются крупные промышленные узлы: Магнитогорский в Челябинской области, Оренбургский, Орский и Медногорский в Оренбургской области, а также предприятия городов Учалы, Сибай, Миньяк (Республика Башкортостан).

В бассейне Урала заметная часть населения потребляет воду для своих нужд из поверхност-

ных источников. На юго-востоке Башкирии отмечена повышенная заболеваемость населения, обусловленная в том числе экологическими и биогеохимическими факторами. Концентрация железа и марганца в питьевой воде в ряде случаев значительно превышает нормативные значения [30]. Цель статьи – показать изменения объемов водопотребления и водоотведения, массы сброса загрязняющих веществ в российской части бассейна в связи с изменяющимися социально-экономическими и технологическими условиями и оценить трансформацию качества воды в р. Урал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов для анализа изменения объемов забираемых и отводимых в поверхностные водные объекты бассейна р. Урал сточных вод, а также сброса загрязняющих веществ в их составе использовались данные государственной статистической отчетности (форма 2-ТП (водхоз)) за период 1990–2022 гг., опубликованные в материалах государственного водно-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001).

го кадастра, сборниках “Воды России (состояние, использование, охрана)”, статистических сборниках “Водные ресурсы и водное хозяйство России”, содержащиеся в материалах автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов Российской Федерации [2–10, 14, 28]. Для анализа развития орошаемого земледелия использовались материалы Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 г. [19–21], данные региональных отделений Управления мелиорации земель по оценке и учету орошаемых сельскохозяйственных угодий и технического состояния оросительных систем [18], по наличию дождевальных машин и установок [27]. Анализ динамики качества поверхностных вод выполнен на основе данных гидрохимической сети Росгидромета [22], докладов о состоянии и об охране окружающей среды по субъектам РФ [11–13, 17, 24], а также научных публикаций [1, 23, 25].

В соответствии с поставленными задачами исследование проведено на основе системного подхода с использованием следующих методов: 1) аналитического (сбор и систематизация первичной информации по объемам отводимых сточных вод, сбросам загрязняющих веществ); 2) специальных (на основе собранных материалов составлены таблицы, построены диаграммы); 3) статистической обработки данных и сравнительного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Урал — третья по длине река Европы (2428 км) с площадью бассейна (включая бессточные районы) ~380 тыс. км². Верховье бассейна находится в Республике Башкортостан и в Челябинской области, средний участок — в Оренбургской области, нижний участок — в Актюбинской, Западно-Казахстанской и Атырауской областях Республики Казахстан. Российская часть бассейна р. Урал занимает территорию площадью 123.2 тыс. км² (по данным [12, 13, 17]).

Республика Башкортостан и Челябинская область занимают небольшую территорию бассейна, но их роль в формировании общей гидролого-экологической ситуации весьма высока. Здесь формируются значительные объемы

речного стока, сбрасывается много загрязняющих веществ как в составе сточных вод, так и с диффузным стоком. Три муниципальных района республики, а также городской округ Сибай полностью расположены на территории бассейна Урала, большая часть еще пяти районов (включая города Баймак и Учалы) — частично. Численность сельского населения значительно преобладает над городским. Из Челябинской области территории двух муниципальных районов входят в бассейн Урала полностью, еще четыре (включая два города и два поселка городского типа) — частично. Кроме того, здесь находится городской округ Магнитогорск с крупными промышленными предприятиями, что предопределяет значительное преобладание городского населения над сельским.

Почти две трети территории Оренбургской области расположены в бассейне Урала. Одиннадцать муниципальных районов области входят в бассейн Урала полностью, еще 8 — частично. Кроме того, здесь расположено много промышленных центров: городские округа Оренбург, Гай, Кувандык, Медногорск, Новотроицк, Орск, Соль-Илецк, Ясный. В области развито как аграрное, так и промышленное производство. Всего в российской части бассейна Урала на 01.1.2021 проживало 2.31 млн человек, в том числе 1.55 млн горожан (17 городов и поселков городского типа) [15].

На территории бассейна р. Урал функционирует сложившийся многоотраслевой водохозяйственный комплекс, основные участники следующие: водоснабжение всех категорий (промышленное, включая тепловые электростанции, коммунально-бытовое и сельскохозяйственное), орошаемое земледелие, прудовое рыбное хозяйство (в начальный период). Структура водопотребления в российской и казахстанской частях бассейна существенно различалась как в советский период, так и в настоящее время. Так как в пределах российской части территории бассейна сформированы крупные индустриальные центры, то основная доля водных ресурсов используется на производственные нужды. В казахстанской части >80% воды используется на регулярное и лиманное орошение, а также на рыбное хозяйство [33].

За период 1990–2022 гг. забор воды в российской части бассейна р. Урал для удовлетворения нужд населения и объектов экономики сократился в 3.9 раза – с 2.86 до 0.74 км³ [2–10, 14, 28]. Связано это в основном с падением объемов производства промышленной и сельскохозяйственной продукции и лишь частично с развитием оборотного водоснабжения и с внедрением водосберегающей техники в ЖКХ и сельском хозяйстве (рис. 1).

Заметно три периода очевидных изменений объема водозабора – существенное падение в 1990-х гг., относительная стабильность в 2001–2012 гг. со снижениями в периоды экономических кризисов и дальнейшими подъемами впоследствии, резкое падение после 2012 г. С 2013 г. стало значительно сокращаться производство электроэнергии, что потребовало меньших объемов воды для охлаждения конденсаторов. Доля электроэнергетики в общем объеме водозабора

снизилась с 81% в 2012 г. до 52% в 2022 г. Крупнейший производитель электроэнергии в бассейне – Ириклинская ГРЭС, имеющая 8 энергоблоков суммарной мощностью 2482.5 МВт, комбинированную (прямоточно-оборотную) систему техводоснабжения. Летом после охлаждения конденсаторов турбин отработанная вода через отводящий канал сбрасывается в водохранилище. В зимний период часть нагретой воды уходит через колодец на входной участок обводного канала, закрывая до 50% общего водопотребления.

Забор воды из поверхностных источников всеми потребителями сокращался более стремительными (в 4.7 раза) темпами, чем из подземных источников (1.8 раза).

Объем использования воды на все нужды за 32 года сократился в 4.1 раза, однако темпы и причины снижения по разным видам водопользования различаются очень сильно (рис. 2).

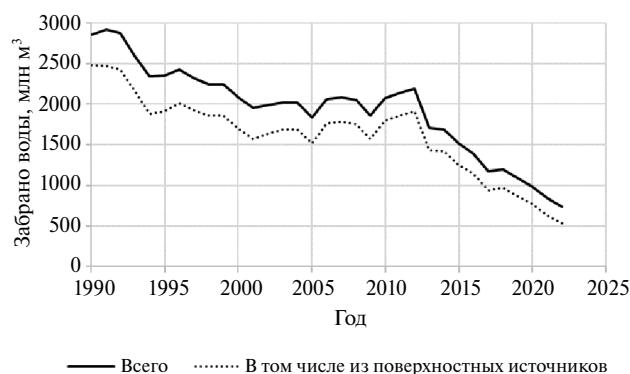


Рис. 1. Объем забранной воды в российской части бассейна р. Урал, млн м³.

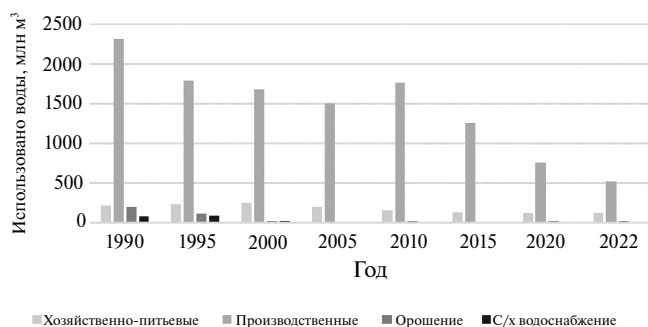


Рис. 2. Объем использованной пресной воды на различные нужды в бассейне р. Урал, млн м³.

Водопользование на хозяйственно-питьевые и бытовые нужды населения в начальный период росло, так как во многих населенных пунктах, особенно в сельской местности и малых городах, строились водопроводы и росло благоустройство жилого фонда. После 2000 г. в результате различных причин объем водопотребления населением в бассейне Урала сократился в 2 раза – с 241.3 до 121.6 млн м³. Одна из причин – снижение численности населения, как и в большинстве регионов России. Так, в Челябинской части бассейна Урала с 2002 по 2022 г. население сократилось на 33.5 тыс. чел. (6.3%), на территории Республики Башкортостан – на 30.5 тыс. чел. (8.6%), в Оренбургской части бассейна Урала – на 198.6 тыс. чел. (12.3%). Более важная причина – снижение удельного среднесуточного водопотребления жителями. С переходом от оплаты за коммунальные услуги по единому тарифу к оплате за количество потребленных ресурсов жители начали массово устанавливать счетчики на воду, выбирать бытовую и санитарную технику, которая более эффективно расходует ресурсы. Для некоторых категорий жителей рост тарифов на воду оказался существенным. В результате среднесуточное потребление воды жителями на коммунальные нужды резко снизилось (табл. 1).

Таблица 1. Динамика удельного потребления воды на питьевые и хозяйственно-бытовые нужды на территории субъектов федерации российской части бассейна р. Урал, л/л (сут чел.)

Год	Республика Башкортостан	Челябинская область	Оренбургская область
2004	123	312	240
2005	111	296	215
2006	104	280	213
2007	99	266	216
2008	96	256	213
2009	90	216	215
2010	85	169	211
2011	59	205	184
2012	60	247	168
2013	64	214	155
2014	75	171	154
2015	73	168	168
2016	73	160	148
2017	69	162	117
2018	69	166	130
2019	92	162	139
2020	66	174	144
2021	85	168	142
2022	81	173	157

Максимальное сокращение удельного водопотребления произошло в Челябинской области (в 1.8 раза за 18 лет). Значительные величины потребления воды из систем централизованного водоснабжения связаны с преобладанием (85%) здесь городского населения. В части Республики Башкортостан, относящейся к бассейну р. Урал, эта доля составляет лишь 34%. Благоустройство жилого фонда сельских населенных пунктов и оборудование их водопроводом значительно уступают благоустройству жилого фонда городов, что и отразилось на более низких показателях водопотребления.

В абсолютном выражении максимально сократился объем водопотребления на производственные нужды — с 2314 до 522 млн м³ за 32 года. Основной объем воды в промышленности бассейна Урала (94–97%) расходуется в таких отраслях, как энергетика и металлургия. За последние десятилетия объем производства в этих отраслях заметно сократился, что и стало главной причиной снижения водопотребления. Кроме того, сказался рост оборотного водоснабжения. Самые значимые по мощности системы оборот-

ного и повторного водоснабжения находятся в таких отраслях промышленности, как металлургия, энергетика, топливная промышленность.

При сокращении объема используемой свежей воды на производственные нужды в 4.4 раза объем оборотной и повторно-последовательной воды увеличился с 5.48 до 5.67 км³, а объем суммарного водоснабжения на производственные нужды снизился незначительно. Коэффициент водооборота (отношение объема оборотного и повторно-последовательного водопотребления к валовому водопотреблению на производственные нужды) в целом по бассейну Урала за этот период вырос с 70.3 до 91.6%. В конце 1990-х гг. он снижался, далее был довольно стабильным, но после 2012 г. стал заметно расти.

Объем используемой воды на производственные нужды в промышленности на территории бассейна р. Сакмары невелик и в 1995 г. составлял ~29 млн м³. Основной объем воды на эти нужды в бассейне (~ 90%) расходуется в таких отраслях, как энергетика и ЖКХ. Коэффициент водооборота в бассейне Сакмары уже в 1995 г.

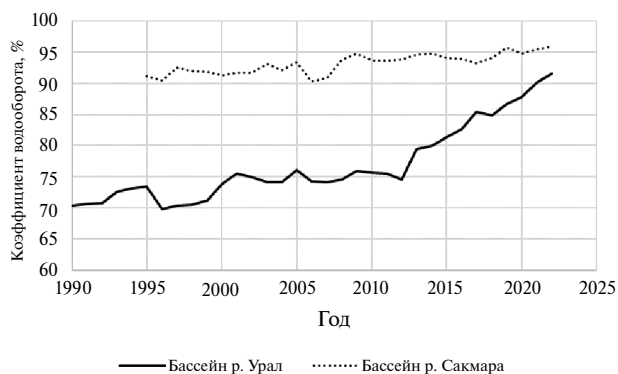


Рис. 3. Динамика коэффициента водооборота в бассейне р. Урал и бассейне р. Сакмары, %.

превышал 91%, тем не менее он постепенно увеличивался и к 2022 г. достиг 95.9% (рис. 3).

Орошаемое земледелие в бассейне Урала активно развивалось в 1970–1980-е гг. Однако с начала 1990-х гг. площадь орошаемых земель (ОЗ) стала существенно сокращаться, что связано с отсутствием необходимого финансового

обеспечения отрасли. Практически разрушена ранее созданная централизованно управляемая система мелиорации земель в стране. Отмечался резкий спад парка дождевальных и поливальных машин, объемов ремонтных работ на насосных станциях, каналах, гидротехнических сооружениях, трубопроводах. Государственные инвестиции в мелиорацию земель в 1991–1995 гг. сократились в 16 раз, а на содержание и ремонт мелиоративных систем выделялось 25–30% требуемых операционных средств. Часть ОЗ передавалась в собственность слабым в финансовом отношении крестьянским хозяйствам (фермерам). Значительные площади ОЗ не поливались из-за отсутствия оборудования, запасных частей, разрывов трубопроводов, ухудшения ремонтной базы. Если в начале 1990-х гг. в регионах бассейна Урала поливалось ~ 90% земель, то к 2022 г. эта цифра снизилась до 20–30% (табл. 2). Еще более значительно за этот период сократилось количество дождевальных машин и установок — от 10 раз в Республике Башкортостан до 36 раз в Челябинской области [27].

Таблица 2. Динамика фактически политых орошаемых угодий, % от наличных угодий

Год	Фактически полито орошаемых угодий, % от наличных		
	Республика Башкортостан	Челябинская область	Оренбургская область
1990	39.8	92.7	89.5
1995	50.2	29.9	60.9
2000	53.9	2.3	63.8
2005	69.1	5.1	30.0
2006	69.1	1.7	32.2
2007	64.5	2.3	16.9
2008	64.5	2.3	16.2
2009	83.4	2.4	22.7
2010	88.2	2.8	27.1
2011	59.2	8.0	26.8
2012	41.0	19.3	22.9
2013	22.0	17.8	22.1
2014	23.2	21.2	22.1
2015	25.5	21.2	18.9
2016	30.1	19.5	18.9
2017	25.4	19.5	20.8
2018	17.0	20.0	20.1
2019	21.3	20.0	18.8
2020	10.3	21.5	18.7
2021	29.4	21.5	18.7
2022	29.4	19.9	21.1

Расчет площади ОЗ в бассейне р. Урал был основан на итогах сельскохозяйственной переписи 2016 г. по трем субъектам федерации [19–21]. Площади ОЗ за более ранние годы определялись как разность между площадью в 2016 г. и площадью введенных в эксплуатацию ОЗ в результате нового строительства и реконструкции ОЗ за соответствующие периоды. Данные по приросту ОЗ после 2016 г. брались из региональных программ по развитию мелиорации.

С 2014 г. в мелиоративном комплексе России намечались положительные сдвиги — улучшилось и стало более стабильным федеральное финансирование, возросли инвестиции в мелиорацию земель местных органов и сельских товаропроизводителей, снизились темпы списания мелиорируемых земель. В связи с принятой Федеральной целевой программой “Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы” началось возрождение мелиорации в стране и площадь ОЗ в бассейне р. Урал стала понемногу расти (табл. 3).

В связи с этим возрос и объем используемой воды на нужды регулярного орошения. Так, уже в 2020 г. он приблизился к объему в конце 1990-х гг. и, несомненно, будет расти и дальше.

Наиболее быстро развивается орошение в Оренбургской области. Она входит в зону рискованного земледелия, и необходимость развития здесь мелиорации земель обусловлена климатическими особенностями региона: засушливым климатом (осадки 250–350 мм в год), высокой солнечной активностью в период вегетации растений, часто повторяющимися засухами. В области действует ведомственная программа по развитию мелиоративного комплекса, а с 2019 г. дополнительно реализуется федеральный проект “Экспорт продукции АПК”, в рамках которого на мелиорацию выделяется значительно больше средств. Только в 2019–2020 гг. в рамках этого проекта в бассейне Урала введено в оборот 3369 га орошаемых земель. За период 1990–2022 гг. объем сброса сточной, шахтно-рудничной и коллекторно-дренажной воды в поверхностные водные объекты российской части бассейна р. Урал сократился в 4.3 раза — с 2257 до 525 млн м³ [2–10, 14, 28]. Связано это в основном с сокращением забора воды для нужд населения и объектов экономики в результате падения производства промышленной и сельскохозяйственной продукции, перехода на замкнутые системы водоснабжения и внедрения водосберегающей техники (рис. 4).

Таблица 3. Площадь орошаемых земель / объем использования воды на нужды регулярного орошения в российской части бассейна р. Урал (тыс. га/тыс. м³)

Год	Республика Башкортостан	Челябинская область	Оренбургская область	Итого бассейн р. Урал
2007	10.61/660	0.84/120	6.60/10120	18.05/10900
2008	10.61/1260	0.84/220	6.83/5440	18.28/6920
2009	10.61/1974	0.84/213	6.95/9108	18.40/11294
2010	10.61/1944	0.84/234	7.20/16683	18.65/18860
2011	10.61/1113	0.84/379	7.45/14364	18.90/15856
2012	10.61/1071	0.84/379	7.45/12847	18.90/14297
2013	11.77/890	1.04/263	7.59/10054	20.39/11217
2014	11.77/1036	1.04/3	7.76/10731	20.57/11770
2015	11.77/1030	1.04/235	7.91/6762	20.72/8026
2016	11.77/1122	1.04/60	7.91/8579	20.72/9760
2017	12.24/1142	1.04/54	8.94/9082	22.22/10278
2018	12.53/1206	1.04/61	9.49/11047	23.05/12313
2019	12.70/1121	1.04/60	11.92/9662	25.66/10843
2020	12.90/547	1.04/210	13.30/19965	27.24/20722
2021	12.90/416	1.04/241	15.25/25181	29.19/25838
2022	13.10/319	1.04/88	15.60/20535	29.54/20942

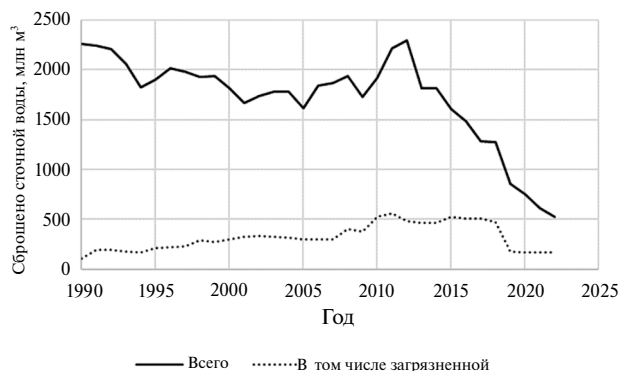


Рис. 4. Объем сброшенной сточной, шахтно-рудничной и коллекторно-дренажной воды в поверхностные водные объекты российской части бассейна р. Урал, млн м³.

Очевидны три периода изменений объема водоотведения — заметное падение в 1990-х гг. в связи с финансово-экономическим кризисом в России, относительная стабильность и подъем в конце 2001–2012 гг. в связи с экономическим ростом, резкое падение после 2012 г. С 2013 г. в регионе стало значительно сокращаться производство электроэнергии, что потребовало меньших объемов воды для охлаждения пара в конденсаторах ТЭС. Резко сократился сброс сточных вод в металлургическом производстве в результате прекращения в ноябре 2018 г. сброса сточных вод ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) в русло Урала и перехода на замкнутую систему водоснабжения [26].

Наблюдалось повышение доли загрязненных сточных вод в общем объеме отводимых сточных вод — с 4.8% в 1990 г. до 39.7% в 2017 г. С прекращением сброса загрязненных сточных вод ММК в р. Урал эта доля снизилась до 21–31%. При этом большая часть загрязненных сточных вод сбрасывалась в водоприемники недостаточно очищенными. Так, в 2022 г. из общего количества воды, относимой к категории загрязненной, 19.5 млн м³ сбрасывалось без очистки, а 145.9 млн м³ — недостаточно очищенной. Объем нормативно очищенных сточных вод на сооружениях очистки за этот период также сократился — с 118 до 2.03 млн м³, или в 58 раз. Доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, за 32 год в бассейне Урала снизилась с 52.2 до 1.2%. Итак,

в 2022 г. очищался до нормативов только один из 140 м³ воды, требующей очистки.

В настоящее время бассейн р. Урал относится к бассейнам с наиболее низкой долей нормативно-очищенной воды в объеме вод, требующих очистки, среди всех крупных рек Российской Федерацией. В 2022 г. здесь очищалось всего 1.2% объема воды, требующей очистки, тогда как в целом по Российской Федерации этот показатель составил ~20%.

Объем сточных вод, в которых содержатся загрязняющие вещества (ЗВ), в российской части бассейна р. Урал в 2021 г. составлял 1.14% общего объема таких вод, сброшенных в России. В то же время доля некоторых ЗВ, сброшенных в составе сточных вод, существенно превышает эту величину. Так, доля сброшенного магния в 2021 г. составляла 4.52% общего объема по РФ, что говорит о том, что концентрация магния в сброшенных сточных водах в 4 раза превышала среднероссийскую величину. Концентрация сухого остатка превышала среднероссийскую величину в 1.9 раза, цинка — в 1.7 раза, нитратов — в 1.2 раза.

Масса сбрасываемых ЗВ в составе сточных вод, отводимых в водные объекты российской части бассейна р. Урал, варьирует в очень широких пределах — от сотен тысяч тонн до десятков килограмм [2–10, 14, 28]. К ЗВ с наибольшей массой относятся сульфаты, хлориды и сухой остаток (табл. 4).

Масса сухого остатка — обобщенный показатель качества воды, характеризует общее содержание растворенных в воде нелетучих минеральных и частично органических соединений, т. е. свидетельствует о минерализации воды. Наибольшую массу вносит в сброс ЖКХ. Пик сброса сульфатов приходился на 1992–1993 гг., а всего за 32 года масса сброса этого ЗВ снизилась почти в 8 раз. Существенный прогресс достигнут в сбросе хлоридов — с 1990 г. их масса снизилась в 27 раз.

Довольно сильно менялся диапазон сбрасываемых взвешенных и органических веществ, нитратов, магния, азота аммонийного. Сброс взвешенных веществ в целом поступательно сокращался

Таблица 4. Динамика сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод в российской части бассейна р. Урал

Загрязняющие вещества	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2022 г.	1990 к 2022, %
Сухой остаток, тыс. т	185.0	197.33	159.72	196.09	288.23	204.07	142.32	133.30	139
Сульфаты, тыс. т	179.98	51.40	34.31	51.52	79.57	49.34	24.66	23.46	767
Хлориды, тыс. т	659.13	26.40	19.70	34.86	62.24	37.72	25.42	24.40	2701
Взвешенные вещества, тыс. т	4.5	3.54	3.10	2.79	3.611	3.013	1.287.	1,337	337
Нитраты, т	186	2049	4187	7067	9852	7982	5095	5648	3.3
БПК полный, т	3170	3560	3000	2740	2055	1353	606.5	653.2	485
Магний, т	136.4	227.2	638.0	2451.4	3764.6	2918.9	1559.1	1355.2	10
Азот аммонийный, т	1707.9	919.6	962.8	1132.2	436.0	229.9	103.2	218.3	782
ХПК, т	—	—	420.0	280.0	301.0	216.3	276.9	1262.0	33*
Фосфаты (по фосфору), т	675.1	1255.3	411.1	563.3	378.4**	285.4	200.3	206.6	327
Нефтепродукты, т	1860.0	100.0	60.0	60.0	79.51	51.74	7.98	7.57	24580
Нитриты, т	67.45	206.34	227.48	342.68	299.78	228.40	75.99	96.775	70
Цинк, т	19.23	32.06	15.53	8.39	53.431	15.902	4.023	3.936	489
НСПАВ, т	40.21	39.80	49.02	18.27	10.682	7.879	6.069	4.298	936
Железо, т	15.89	114.10	100.15	76.91	63.655	63.317	25.956	25.083	63
Марганец, т	—	5.54	8.10	2.010	22.005	5.789.	0.074	0.141	3929***
Медь, т	3.50	2.82	2.86	2.13	2.381	1.462	0.450	0.802	436
Жиры, масла, т	5.97	0.80	0.69	2.19	3.463	0.789	0.0554	0.0285	20969
Никель, т	—	0.506	0.061	0.280	0.662	0.734	0.037	0.026	1960***
Фенолы, т	1.16	0.740	0.920	0.440	0.875	0.431	0.118	0.120	964
Алюминий, кг	880	440	210	100	140.2	126.7	99.7	142.9	616
Свинец, кг	—	10.0	10.0	40.0	13.22	28.70	30.92	23.79	42***
Кадмий, кг	—	—	160.0	40.0	132.30	37.98	7.02	5.43	2947*
Хром трехвалентный, кг	210	60	120	60	17.69	29.27	39.92	21.37	983

* 2000 г. к 2022 г., %.

** 2009 г.

*** 1995 г. к 2022 г., %.

и к 2022 г. снизился по сравнению с 1990 г. в 3.4 раза. Сброс нитратов неуклонно рос с 1990 по 2011 г., после чего снизился в два раза. В итоге, в 2022 г. масса сбрасываемых нитратов превышала массу в 1990 г. в 30 раз, это максимальное превышение среди всех ЗВ. ЖКХ сбрасывает 85% всех нитратов. Биохимическое потребление кислорода (БПК) — один из важнейших критериев уровня загрязнения водоема легкоокисляемыми органическими веществами — в бассейне Урала сократилось за этот период в ~5 раз.

Масса сбрасываемого азота аммонийного снизилась за 32 года в 8 раз. Масса сбрасываемого магния систематически увеличивалась первые десятилетия и в 2011 г. превысила уровень 1990 г. в 30 раз. С 2019 г. ММК прекратил сброс сточных вод в р. Урал, что отразилось на резком снижении сброса

магния и других ЗВ. Тем не менее масса сбрасываемого магния в 2022 г. превышала уровень 1990 г. в 10 раз, и требуется дальнейшая работа по его снижению.

Масса сбрасываемых нефтепродуктов снизилась в 2022 г. по сравнению с экстремальным 1990 г. в 246 раз, но и по отношению к другим годам конца XX в. сокращение этого важнейшего ЗВ было существенным. Сброс фосфатов снизился в 3 раза, а сброс нитритов даже увеличился. Сброс органических веществ (по ХПК) долгие годы снижался, но с 2019 г. снова стал расти, превысив в 2022 г. значения 2000 г. в 3 раза. На протяжении 20 лет масса сбрасываемого цинка почти не менялась, но в 2009–2011 гг. заметно выросла. Начиная с 2012 г. металлургическая отрасль снижала сброс цинка до 4 т в 2020-х гг.

Сброс НСПАВ неуклонно снижался все годы, кроме 2000 г., когда наблюдался одиночный всплеск. За весь период масса сброса снизилась в 9.4 раза. Масса сбрасываемого железа после резкого увеличения в середине 1990-х гг. снижалась очень медленно, но в 2019–2022 гг. стабилизировалась. В целом за период 1990–2022 гг. отмечается рост сброса железа в 1.5 раза.

Масса сбрасываемой меди, за исключением экстремального 1993 г., все время снижалась. Metallургическая отрасль — основной поставщик меди в водные объекты — с 2019 г. сброс меди практически прекратила. В целом за 32 года сброс меди сократился в 4.4 раза.

Сброс марганца в бассейне Урала достиг пика (18–22 т) в 2010–2011 гг. и в дальнейшем стал резко снижаться. С 2020 г. сброс марганца стал измеряться десятками килограммов. Тем не менее в 2022 г. его сброс превышал уровень 1995 г. в 39 раз. Сброс никеля отличается очень большой нестабильностью — в течение длительного периода времени рост сброса чередуется с значительным снижением массы загрязнений. Если брать крайние точки, то в 2022 г. масса сброса снизилась по сравнению с 1995 г. в 20 раз.

Сброс фенолов с 1990 г. на протяжении 19 лет поступательно снижался, однако в 2010–2013 гг. отмечается заметный рост сброса этого вещества. В последующее время сброс фенолов только снижался. За 1990–2022 гг. масса сбрасываемых фенолов снизилась почти в 10 раз. Масса сбрасываемого алюминия сильно колебалась в период 1990–2006 гг., после чего стала поступательно снижаться. Всего за 32 года масса сбрасываемого алюминия снизилась в 6 раз.

В российской части бассейна р. Урал в небольших количествах отмечается сброс свинца, кадмия и трехвалентного хрома. С 1995 по 2022 г. сброс свинца увеличился в 2.4 раза. Сброс хрома обычно был в пределах 30–70 кг, но периодически наблюдались аварийные сбросы, когда масса хрома увеличивалась до 110–430 кг. Всего за 1990–2022 г. его сброс снизился почти в 10 раз.

Итак, по двум ЗВ (сухой остаток, нитриты) сбрасываемая масса за 32 года изменилась не-

значительно, по шести ЗВ она снизилась в 3–7 раз, по семи другим ЗВ — в 8–27 раз. По кадмию и марганцу сброс сократился в 29–39 раз. Максимальный успех достигнут в снижении сброса двух ЗВ — жиров и масел, а также нефтепродуктов (в 210–246 раз).

Однако по пяти ЗВ отмечается заметный рост сброса, несмотря на почти четырехкратное сокращение сброса сточных вод и ввод новых мощностей очистных сооружений. Масса сбрасываемого железа увеличилась в 1.6 раза, трудноокисляемых органических веществ (по ХПК) и свинца в 2.4–3.0 раза, магния в 10 раз, нитратов — в 30 раз. На три вида экономической деятельности (производство металлургическое; добыча металлических руд; забор, очистка и распределение воды) приходится 92–99% суммарного сброса основных ЗВ.

Анализ динамики качества поверхностных вод в бассейне р. Урал выполнен по данным гидрохимической сети Росгидромета [11–13, 17, 22, 24]. Классификация степени загрязненности воды рассматривается как условное разделение всего диапазона состава и свойств природной воды в условиях антропогенного воздействия на разные интервалы с постепенным переходом от “условно чистой” до “экстремально грязной” категории качества воды по величинам комбинаторного индекса загрязненности воды с учетом ряда дополнительных факторов [22]. Удельная величина комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) представляет собой комплексный относительный показатель степени загрязненности поверхностных вод и может варьировать 1 до 16, большему его значению соответствует худшее качество воды.

Исходя из приведенных выше данных о снижении объема загрязненных сточных вод и сброса ЗВ в водные источники можно было бы ожидать ощутимого улучшения их качества. Однако в целом по руслу р. Урал качество воды остается неудовлетворительным и изменилось очень незначительно (за исключением нескольких створов) под влиянием ряда неконтролируемых (рассредоточенных) источников загрязнения, а также источников вторичных (накопленных) загрязнений. По многим оценкам, именно они

вносят основной вклад в загрязнение водных объектов [16]. Помимо сточных вод предприятий источниками загрязнения поверхностных вод являются смыв почвы, минеральных удобрений, органических веществ с сельхозугодий и животноводческих ферм, расположенных по берегам рек бассейна Урала, ливневой поверхностный сток с урбанизированных территорий и промплощадок.

Комплексная оценка качества воды по стволу р. Урал в пределах Челябинской области приведена на рис. 5.

В верховьях р. Урал на территории Челябинской области качество воды за более чем десятилетний период практически не изменилось и вода по-прежнему оценивается от “загрязненной” (3а) до “грязной” (4а). Наблюдаются очень незначительные положительные тренды в трех анализируемых створах.

В створе г. Верхнеуральска организованные источники загрязнения отсутствуют и речная вода загрязняется преимущественно поверхностным стоком с водосборной площади. При этом наблюдается существенное загрязнение тяжелыми металлами, концентрация марганца в некоторые годы превышала ПДК в 7–10 раз. Ниже г. Уральска, а также в районе г. Магнитогорска р. Урал загрязняется недостаточно очищенными промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами [23].

На территории Оренбургской области на некоторых участках р. Урал наблюдалось улуч-

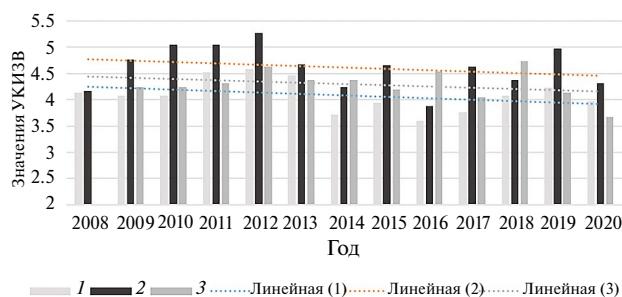


Рис. 5. Значения УКИЗВ р. Урал за 2008–2020 гг. в Челябинской области: 1 – 1 км ниже г. Верхнеуральска; 2 – Магнитогорское водохранилище, 10 км ниже города; 3 – с. Агаповка.

шение качества воды: классы качества воды и разряды не всегда изменялись, но при этом значение УКИЗВ уменьшалось (рис. 6). Особенно заметное улучшение качества воды произошло в Ириклинском водохранилище (где оно изменилось от “очень загрязненной” до “загрязненной”) и ниже городских очистных сооружений г. Оренбурга (где оно изменилось от “грязной” до “загрязненной”).

Вблизи п. Илек наблюдается постоянное загрязнение воды р. Урал органическими веществами и тяжелыми металлами. Содержание вредных ингредиентов в воде часто в десятки раз выше ПДК. Данный участок р. Урал можно отнести к зоне с критической экологической ситуацией [1]. На рис. 6 виден незначительный тренд ухудшения качества воды в данном створе по показателю УКИЗВ.

Улучшение качества воды могло быть и более радикальным. Сток воды и наносов в земледельческой зоне поставляет в реки и водоемы до 80–90% фосфора, азота и пестицидов. Однако осуществление одного из важнейших меропр-

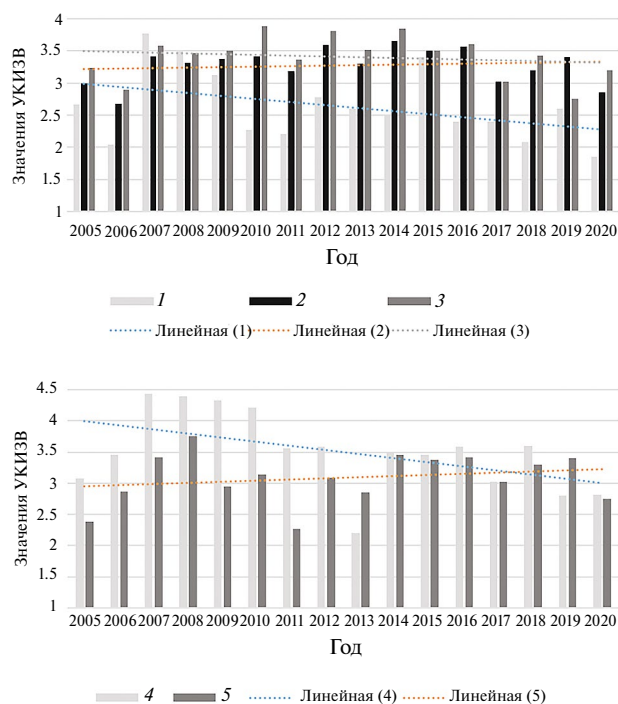


Рис. 6. Значения УКИЗВ р. Урал за 2005–2020 гг. в Оренбургской области: 1 – Ириклинское водохранилище, пгт Ирикля; 2 – 6.5 км ниже г. Орска; 3 – Новотроицк; 4 – 0.5 км ниже ГОС Оренбурга; 5 – 1 км выше п. Илек.

ятий по охране земель и вод — создания противоэрозионных лесных насаждений — резко сократилось. В субъектах федерации на российской территории бассейна р. Урал после 2009 г. полностью прекратили высаживать противоэрозионные насаждения. Аналогичная картина наблюдается и с созданием полезащитных лесополос. В конце 1990-х — начале 2000-х гг. в Республике Башкортостан ежегодно создавалось 400–700 га полезащитных лесополос, но после 2008 г. это важнейшее мероприятие прекратилось. В Оренбургской области не создают лесополосы с 2004 г., в Челябинской — с 1999 г. [29, 31, 32].

В [34] рассчитан удельный экологический ущерб (на 1 га пашни), наносимый водам Оренбургской области поступающими аммонийным азотом и фосфором с диффузным стоком. Плата за вынос этих биогенных веществ вполне доступна сельскохозяйственным производителям и позволит обеспечить непрерывное создание новых искусственных лесополос в водоохранных зонах водных объектов. Для улучшения экологической ситуации в бассейне р. Урал необходимо в кратчайшие сроки по крайней мере вернуться к объемам работ, выполняемым 20–25 лет назад, а еще лучше превысить их.

ВЫВОДЫ

Заметное сокращение водопотребления и водоотведения в российской части бассейна р. Урал связано в основном с падением объемов производства промышленной и сельскохозяйственной продукции, а также с развитием оборотного водоснабжения в промышленности. Отмечено повсеместное снижение удельного среднесуточного водопотребления жителями в результате установки водосчетчиков, применения водосберегающей техники и арматуры.

Площадь фактически политых земель в регионах бассейна Урала снизилась от 90% площади орошаемых земель в начале 1990-х гг. до 10–20% к 2020 г. В последние годы началось возрождение мелиорации и площадь орошения в бассейне р. Урал начала понемногу расти, а объем использования воды на нужды регулярного орошения уже в 2020 г. приблизился к величинам, харак-

терным для конца 1990-х гг., и, несомненно, будет расти и дальше.

Объем нормативно очищенных сточных вод на сооружениях очистки за 1990–2022 гг. сократился в 58 раз. Доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, в российской части бассейна Урала снизилась с 52.2 до 1.2%.

Масса большинства загрязняющих веществ в составе сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, снизилась за период 1990–2022 гг. в 3–20 раз, но по пяти веществам отмечается заметный рост массы сброса. В верховьях р. Урал за 2008–2020 гг. качество воды практически не изменилось. На территории Оренбургской области на некоторых участках р. Урал наблюдалось улучшение качества воды.

Посадка противоэрозионных лесных насаждений на землях сельскохозяйственного назначения российской части территории бассейна р. Урал, а также создание полезащитных лесополос после 2009 г. полностью прекратились. Необходимо в кратчайшие сроки вернуться к объемам работ, выполняемым 20–25 лет назад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронский В.А., Солопова В.А., Байтелова А.И. Экологический мониторинг качества воды реки Урал в районе неорганизованного пляжа села Илек Оренбургской области // Строительство и техногенная безопасность. 2020. № 19 (71). С. 95–104. DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-95-104
2. Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2009 году (Статистический сборник) / Под ред. Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова. М.: НИА-Природа, 2010. 372 с.
3. Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2018 году (Статистический сборник) / Под ред. Н.Г. Рыбальского, В.А. Омеляненко. М.: НИА-Природа, 2019. 274 с.
4. Водные ресурсы Российской Федерации. Статистический сборник / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: НИА-Природа, 2006. 176 с.
5. Воды России (состояние, использование, охрана). Екатеринбург: РосНИИВХ, 1992. 96 с.; 1993. 96 с.; 1994. 86с.; 1995. 88 с.; 1996. 104 с.; 1998. 134 с.; 1999. 146 с.; 2001. 158 с.; 2002. 138 с.; 2003. 136 с.; 2005. 133 с.; 2006. 112 с.

6. Воды России (состояние, использование, охрана). 1986–1990 гг. Свердловск: УралНИИВХ, 1991. 148 с.
7. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы Российской Федерации. Обобщенные данные использования вод за 2005 год. М.: Федеральное агентство водных ресурсов, Водниинформпроект, 2006. Кн. 1. 63 с.; Кн. 2. 94 с.; Кн. 3. 113 с.; Кн. 4. 98 с.; Кн. 5. 72 с.
8. Государственный водный кадастр. Данные обобщения использования вод по РСФСР за 1991 год. М.: Мин-во экологии и природных ресурсов России, Комитет по водным ресурсам, Росгипроводхоз, 1992. 209 с.
9. Государственный водный кадастр. Данные обобщения использования вод по России за 1992 год. М.: Водниинформпроект, 1993. 213 с.
10. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество (ежегодное издание). 1990–2010 гг. Л.; СПб.: Федеральная служба РФ по гидрометеорологии и мониторингу окр. среды; М-во прир. ресурсов РФ, Гидрометеоиздат, 1990. 136 с.; 1991. 136 с.; 1992. 64 с.; 1993. 86 с.; 1994. 90 с.; 1995. 92 с.; 1996. 92 с.; 1999. 96 с.; 1999. 94 с.; 2000. 92 с.; 2000. 94 с.; 2001. 104 с.; 2002. 112 с.; 2003. 116 с.; 2004. 118 с.; 2005. 164 с.; 2006. 166 с.; 2007. 174 с.; 2008. 153 с.; 2010. 152 с.; 2011. 148 с.
11. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Оренбургской области в 2012 году. [Электронный ресурс]. <https://mpr.orb.ru/activity/624> (дата обращения: 25.12.2023)
12. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Оренбургской области в 2020 году. [Электронный ресурс]. <https://mpr.orb.ru/activity/624> (дата обращения: 25.12.2023)
13. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2020 году. [Электронный ресурс]. <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures> (дата обращения: 25.12.2023)
14. Данные наблюдений за объемом вод при водопотреблении и водоотведении на всех водных объектах (по форме 2-ТП (водхоз)) // Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. [Электронный ресурс]. <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513> (дата обращения: 25.12.2023)
15. Дёмин А.П. Трансформация водопотребления и водоотведения в российской части бассейна трансграничной реки Урал // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. № 1. С. 82–93. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-1-82-93
16. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
17. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области. [Электронный ресурс]. <https://mineco.gov74.ru/mineco/activities/oxranaokruzhayushhejsredychely/informaciyaobekologicheskosit.htm> (дата обращения: 25.12.2023)
18. Информационный портал ВНИИ “Радуга”. [Электронный ресурс]. <https://inform-raduga.ru> (дата обращения: 25.12.2023)
19. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года в Челябинской области. Т. 3. Земельные ресурсы и их использование. Челябинск: Челябинскстат, 2018. 104 с.
20. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года по муниципальным образованиям Республики Башкортостан. Т. 3. Земельные ресурсы и их использование. Уфа: Башкортостанстат, 2018. 238 с.
21. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года / Территориальный орган гос. статистики по Оренбургской области. Оренбург, 2018. 104 с.
22. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник. 2010. Ростов-на-Дону: Изд-во Гидрохим. ин-та, 2011. 572 с.; Ежегодник. 2011. Ростов-на-Дону: Изд-во Гидрохим. ин-та, 2012. 553 с.; 2013. 555 с.; 2014. 568 с.; 2015. 530 с.; 2016. 552 с.; 2017. 556 с.; 2018. 555 с.; 2019. 561 с.; 2020. 578 с.; 2021. 618 с.
23. Козлова М.А., Сивохин Ж.Т. Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна реки Урал // Вод. хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 107–119. DOI: 10.35567/19994508_2022_6_7
24. Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2009 году. [Электронный ресурс]. <https://mineco.gov74.ru/mineco/activities/oxranaokruzhayushhejsredychely/informaciyaobekologicheskosit.htm> (дата обращения: 25.12.2023)
25. Куксанов В.Ф. Река Урал – экологические проблемы и пути их решения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. № 7. С. 8–15.
26. ММК планомерно снижает вредное воздействие на реку Урал. [Электронный ресурс]. <https://news.rambler.ru/ecology/43266982-mmk-planomerno-snizhaet-vrednoe-vozdeystvie-na-reku-ural> (дата обращения: 25.12.2023)
27. Наличие сельскохозяйственной техники. [Электронный ресурс]. <http://fedstat.ru> (дата обращения: 25.12.2023)
28. Основные показатели использования вод в СССР за 1990 год. Минск, ЦНИИКИВР, 1991. 142 с.

29. Охрана окружающей среды в России. Статистический сборник. М: Госкомстат России, 2001. 229 с.
30. Рафикова Ю.С., Семенова И.Н., Биктимерова Г.Я. Содержание тяжелых металлов в питьевой воде юго-восточных районов Республики Башкортостан // Естественные и технические науки. 2016. № 1 (91). С. 20–23.
31. Сведения о воспроизводстве лесов и лесоразведении. Бюллетени об охране окружающей среды (электронные версии) [Электронный ресурс]. <https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13295> (дата обращения: 25.12.2023)
32. Сельское хозяйство, охота и охотничье хозяйство, лесоводство в России. 2013. Статистический сборник. М.: Росстат, 2013. 462 с.
33. Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилёв А.А., Падалко Ю.А. Проблемы устойчивого водопользования в трансграничном бассейне реки Урал // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 4. С. 504–516. DOI: 10.7868/S0321059617040162
34. Чирков С.А. Формирование механизма финансирования водоохранного лесонасаждения в сельскохозяйственных районах Оренбургской области (на примере р. Суундук) // Наукосфера. 2020. № 10–2. С. 8–12.

WATER CONSUMPTION AND DISPOSAL IN THE RUSSIAN PART OF THE TRANSBOUNDARY URAL RIVER: TRENDS AND THE EFFECT ON WATER QUALITY

A. P. Demin*

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

**e-mail: deminap@mail.ru*

The study shows variations in the volumes of water consumption and disposal, as well as the mass of pollutant discharges in the Russian part of the Ural River basin under changing socioeconomic and technological conditions and gives estimates of water quality transformations in the river. It was found that since 1990 to 2022, water withdrawal for meeting the needs of the population and economy in the Russian part of the Ural River basin decreased by 3.9 times. The water turnover factor in the basin increased from 70.3 to 91.6%. The mass of most pollutants in the discharged wastewater has decreased by 3–20 times, though five pollutants show an appreciable increase in their discharge volumes. In the upper reaches of the Ural River, the water quality estimated by the specific value of combinatory water pollution index has practically not changed in 2008–2020, while in its middle reaches, an increase in water quality was recorded.

Keywords: water intake, recycling water supply, mean daily water consumption, land irrigation, wastewaters, pollutant discharges, water quality.

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БАССЕЙНА р. УРАЛ
И ВОЗМОЖНОСТЬ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЕГО ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

УДК 556.18.(282.247.423)

ОЦЕНКА СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОТРЕБНОСТЕЙ
В РЕЧНОЙ ВОДЕ НА КАЗАХСТАНСКОМ УЧАСТКЕ р. УРАЛ

© 2024 г. Д. В. Магрицкий^{a, b, *}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: magdima@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.02.2024 г.

После доработки 14.03.2024 г.

Принята к публикации 14.03.2024 г.

На основе стационарных и экспедиционных гидрологических данных, сведений по водохозяйственному комплексу и объемам водопользования впервые рассчитаны минимально допустимый, средний и оптимальные гидрографы (с месячным шагом) притока уральских вод с территории России на территорию Западно-Казахстанской и Атырауской областей, который не ограничивал бы функционирование основных участников казахстанского водохозяйственного комплекса, не ухудшал бы качество жизни населения и условия существования водных и околоводных биоценозов, сохранял бы реку как гидрографический объект. Полученные гидрографы суммируют, во-первых, величины современного и перспективного водопотребления в городах Уральск, Атырау и многочисленных сельских поселениях, забора воды оросительными и обводнительными каналами, включая Кушумский канал; во-вторых, потребности речного судоходства в гарантированных глубинах и осуществлении непрерывной навигации с мая по октябрь; в-третьих, экологический сток, необходимый для воспроизводства осетровых пород рыбы, сохранения биопродуктивности и биоразнообразия пойменных экосистем. Последний элемент потребовал нестандартных решений, в том числе на базе существующих отечественных подходов к определению критических и оптимальных (по отношению к пойменно-русовым экосистемам) величин. Еще одним и совершенно новым результатом исследований стал анализ многолетней динамики максимальных и минимальных уровней в низовьях Урала, частоты, продолжительности и глубины затопления поймы.

Ключевые слова: река, пойма, канал, пост, сток и уровни воды, водопотребление, судоходство, осетр, пойменная экосистема.

DOI: 10.31857/S0321059624050024 EDN: VYEHSY

Рациональное и экологически безопасное трансграничное водопользование предполагает сохранение государствами такого водного стока и режима трансграничной реки, которые не ограничивали бы устойчивого, эффективного и безопасного функционирования основных участников водохозяйственного комплекса, не наносило бы населению, социально-хозяйственным объектам, аквальному и околоводным экосистемам ущерба, сохраняло бы реку как гидрографический объект.

Нижний Урал — как раз такой водный объект, но его случай не самый простой. Главная особенность р. Урал — значительная внутригодовая и межгодовая изменчивость водного стока, частое достижение уровнями и расходами воды отметок неблагоприятного или опасного гидрологического события [19]. Значительная часть бассейна и, конечно, низовье реки относятся к районам с недостаточным увлажнением. В результате по-

требности населения, развитой промышленности и сельского хозяйства в воде нередко превышают водно-ресурсные возможности реки и ее притоков, особенно в маловодные сезоны и годы. Кроме того, среднее и нижнее течение Урала играет важную экологическую роль в воспроизводстве осетровых пород рыб [4, 13, 26, 40]. Но со второй половины XX в., особенно с 2008 г., водно-ресурсный и экологический потенциал реки нарушен изменениями во внутригодовом водном режиме и текущим глубоким маловодьем. В этих условиях все чаще звучит вопрос о рациональном использовании и справедливом распределении между Россией и Казахстаном уральских вод. Несмотря на заключенные между государствами договоры и соглашения о принципах использования и охраны водных ресурсов бассейна, конкретные требования по величине речного стока в разные по водности годы и ее распределению в течение года четко не прописаны.

Одно из препятствий — объективные ограничения возможностей перестройки режима эксплуатации Ириклинского водохранилища, как того требует ряд представителей общественности и экологи. Другое препятствие — отсутствие научно-обоснованного понимания того, сколько реально воды требуется казахстанскому участку р. Урал и с какого момента наступает водный кризис. Поэтому главная задача настоящего исследования — впервые приблизительно оценить годовые, сезонные и месячные размеры потребностей населения Казахстана, промышленности, сельского и рыбного хозяйства, водного транспорта, пойменных и русловой экосистем в уральской воде. Вторая важная задача — вынести на обсуждение предлагаемый подход, который как соответствует методам, изложенным в [10, 11, 23, 39], так и имеет новые черты, — с целью дальнейшего его совершенствования и в итоге определения необходимых для Казахстана объемов уральской воды, перехода на заключительный этап их исполнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Информационной основой для исследований послужили данные гидрологического мониторинга на постах гидрометслужбы двух стран, водохозяйственного учета, материалы двух гидрологических экспедиций в 2019 г. с участием автора настоящей статьи, сведения из научных публикаций, традиционных и электронных СМИ, а также различные правительственные документы.

Сведения о среднесуточных, среднемесячных и характерных расходах воды брались для постов в г. Оренбурге (1296 км от впадения реки в море; ряд наблюдений с 1927 по 2021 гг.), п. Январцево (940-й км, ряд расходов воды с 2008 г.), с. Кушум (732-й км, с 1912 г.), п. Индербор (325 км, с 2009 г.), с. Тополи (200-й км, с 1933 по 1973 г.), п. Махамбет (145-й км, с 1974 г.), г. Атырау (27-й км, бывший г. Гурьев; с 1950 г.), расположенных на р. Урал, а также для постов на его притоках — в с. Каргале на р. Сакмаре (в 32 км от впадения в р. Урал, с 1920 г.), с. Чилик (в 112 км, с 1949 г.) и г. Актобе (в 493 км, с 1938 г.) на р. Илек, с. Григорьевка (в 83 км, с 1954 г.) на р. Утве и Ясная Поляна на р. Кинделе (в 47 км, с 1950—

1987 г.). По среднесуточным уровням воды использованы данные наблюдений в г. Оренбурге, с. Илек (1087-й км), п. Январцево, г. Уральске (799-й км, с 1938 г.), с. Кушум, п. Мергенево (560-й км, 1942 г.), с. Тайпак (бывший п. Калмыково, 385-й км, 1927 г.), с. Тополи, п. Махамбет и г. Атырау.

Информация о водохозяйственном комплексе казахстанского участка р. Урал и его показателях бралась из нескольких источников. Это открытые для просмотра “Схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов реки Урал” в нескольких томах [35], ежегодные данные по водопользованию из справочных изданий Республики Казахстан (РК), таких как “Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов”, “Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество” [7, 32], а также из обычных гидрологических ежегодников. Вторым источником ценных сведений стали материалы двух экспедиций МГУ имени М.В. Ломоносова в марте и июле 2019 г., охватившие р. Урал от г. Уральска до Каспийского моря. Они были организованы на средства и при поддержке Международного научного комплекса “Астана”, Акимата Атырауской области. Подробно о них и их результатах рассказано в [19, 21]. Третий источник — картосхемы, паспорта развития административных районов и населенных пунктов. Сопоставление этих данных с экспедиционными материалами, спутниковыми снимками с ресурсов Google Earth и Яндекс Карты [46, 53] позволило получить такие же сведения для необследованных участков нижнего Урала. Четвертый источник данных — материалы от региональных подразделений республиканских ведомств и министерств, Казгидромета, Казводхоза и КазНИИРХа, структур исполнительных органов Атырауской и Западно-Казахстанской (ЗКО) областей. Пятый блок составили монографии, научные и научно-популярные статьи, отраслевые нормативные документы, программы развития субъектов водохозяйственного комплекса, атласы и тематические карты и т. п.

На основе материалов полевых исследований, топографических карт и спутниковых снимков создана многослойная ГИС гидрографической

сети и водохозяйственного комплекса казахстанского участка р. Урал. Экспедиционные материалы 2019 г. вместе с публикуемыми (в гидрологических ежегодниках) данными по водопользованию и режиму работы каналов, наряду с данными Жайык-Каспийской бассейновой инспекции и Казводхоза и другой информацией, позволили оценить современное и перспективное водопотребление, разнесенное по длине реки и общее.

ОЦЕНКА ПОТРЕБНОСТЕЙ В ВОДЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ТЭС, НАСЕЛЕНИЯ И СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Общие показатели водопользования

Водохозяйственный комплекс, сложившийся в Казахстане на базе использования вод р. Урал, заметно уменьшает его сток. Пик водопользования пришелся на 1980-е гг. [7, 8, 18]. Участников водохозяйственной деятельности тогда насчитывалось 152: ~7 от границы с РСФСР до г. Уральска, 40 — между г. Уральском и с. Кушум, 36 — от с. Кушум до п. Махамбет, 47 — между п. Махамбетом и г. Гурьевым, 22 — в дельте. Благодаря им сток уменьшался в среднем на 1.56 км³/год, или 15% объема, поступавшего в Казахскую ССР, с ростом этой доли в маловодные годы в 1.5 раз. Больше всего расходовалось воды в Западно-Казахстанской области благодаря Кушумскому каналу. С учетом высоких естественных потерь общее снижение стока приближалось к 2 км³/год, или ~19.2% суммарного притока. Сбросов обратно в реку почти не было. В 1990-х гг. объемы водопотребления резко сократились, главным образом с 1992 по 1999 г. Современное уменьшение стока по длине казахстанского участка Урала оценивается автором статьи в 0.80–0.95 км³/год [19]: 59.5% в половодье (апрель–июнь) и 23.4% в июле–октябре. Это подтверждается также данными наблюдений на постах. Сбросов сточных вод в нижний Урал по-прежнему почти нет, что уравнивает водозабор и безвозвратное водопотребление.

Современное водопользование в Западно-Казахстанской области

Западно-казахстанский участок начинается от устья р. Илек, но лишь ниже с. Кирсаново

охватывает как левобережье, так и правобережье р. Урал. Субъектами водохозяйственного комплекса, напрямую связанными с главной рекой, являются водное хозяйство г. Уральска, Кушумский канал и несколько объектов, подающих уральскую воду на пастбища, в домовые хозяйства и оз. Шалкар. Важная особенность для ЗКО — доминирование подземных вод в структуре хозяйственно-питьевого и сельскохозяйственного водопользования. Разведанные месторождения подземных пресных вод вблизи р. Урал сосредоточены на участке от государственной границы и примерно до аула Карауылтобе (570-й км) [32, 51]. Основные эксплуатируемые месторождения — это перспективное Январцевское (в 50–70 км северо-восточнее г. Уральска, эксплуатационные запасы 54.5 тыс. м³/сут), давно используемое Уральское (вблизи г. Уральска, 65.6 тыс. м³/сут, с 1973 г.) и Серебряковское (в 25–30 км юго-западнее г. Уральска, 24–43 тыс. м³/сут, с 1982 г.) [47]. Все они расположены на правобережье реки, их запасы в последнее время переоцениваются, бурятся дополнительные скважины, ремонтируются и строятся новые водоводы, извлечение растёт, в том числе с ущербом и для речного стока. Например, если в 1980–2010-х гг. добыча на Январцевском месторождении варьировала от 21 до 27 тыс. м³/сут, то с 2020–2021 гг. стали добывать 35 тыс. м³/сут [52]; на Серебряковском месторождении добыча выросла с 1.6 тыс. м³/сут в 2006–2008 гг. до 2.5 тыс. м³/сут в 2014–2017 гг. [44]. Левобережные поселения снабжаются водой с Жарсуатского, Ново-Жарсуатского, Федоровского и других небольших месторождений с дебитом от нескольких сотен до нескольких тысяч кубических метров в сутки.

Максимальные потребности в воде социально-хозяйственного комплекса г. Уральска оцениваются в 70 тыс. м³/сут: 25–30 тыс. м³ речных вод в сутки забирается насосной станцией Уральской ТЭЦ, 35 тыс. м³/сут перебрасываются с Уральского месторождения подземных вод, 5–10 тыс. м³/сут — дефицит. Особенно кризисными были 2020 и 2021 гг. Пик водопотребления приходится на июль–август. Сточные воды сбрасываются в каскад накопителей и биологических прудов, а также на рельеф местности, хотя с 2015 г. от этой практики стараются уйти. Сброс обратно в реку ≤2400 м³/сут и связан с промыв-

кой фильтров от наносов, используемых станцией водоподготовки.

Самый крупный водопользователь в ЗКО и на казахстанском участке — это Кушумский канал. Он отделяется от р. Урал (от протоки Чаган) вблизи п. Круглоозерного и имеет дополнительную подпитку у аула Кушум. Вода поступает самотеком. Канал питает огромную Урало-Кушумскую обводнительную и оросительную систему (ООС) (рис. 1), объединяющую 13.0–15.3 тыс. га земель под регулярное орошение, 86.0–97.6 тыс. га земель лиманного орошения, 2177 тыс. га пастбищных угодий. Этот важный для всего Западного Казахстана комплекс образован на месте древней Кушумской дельты и ее рукавов [38], построен в 1940 г., в проектом режиме функционирует с середины 1950-х гг. Сама система полностью введена в эксплуатацию в 1974 г. и, помимо задач орошения, обеспечивает водой 38 сельских округов пяти районов ЗКО, имеет общую протяженность каналов 1232 км, включает четыре больших водохранилища и другие объекты и сооружения [27]. Вода из Кушумского канала расходится, по данным РГП “Казводхоз” в 2013 г., на лиманное

(10.5 млн м³/год) и регулярное (5.3) орошение, обводнение пастбищ (3,6), водоснабжение предприятий (0.24), общее водопользование (48.0), переброску стока в сторону р. Большой Узень (71.2), наполнение водохранилищ (142.4) и экологические цели (331.5 млн м³/год). Последний пункт не раскрывается.

В XXI в. забор речной воды в Урало-Кушумскую ООС существенно уменьшился и, по сути, вернулся к показателям начальных лет своей эксплуатации (рис. 2). Если в 1970–1980-х гг. пиковые объемы изъятия речных вод Кушумским каналом были 822 млн м³/год, то в 2002–2017 гг. водозабор уменьшился до 570 млн м³/год (по наблюдениям на посту в истоке канала) и 387 млн м³/год (по сведениям от Западно-Каспийского филиала РГП “Казводхоз”). В 2018–2021 гг. из-за низких уровней в главной реке в канал поступило всего 230 млн м³. В итоге заполнение водохранилищ составило 21.4%. Причиной серьезного сокращения водозабора было уменьшение площадей обслуживаемых земель — до 1061 и 2500 га земель регулярного и лиманного орошения, 30 тыс. га пастбищных угодий.

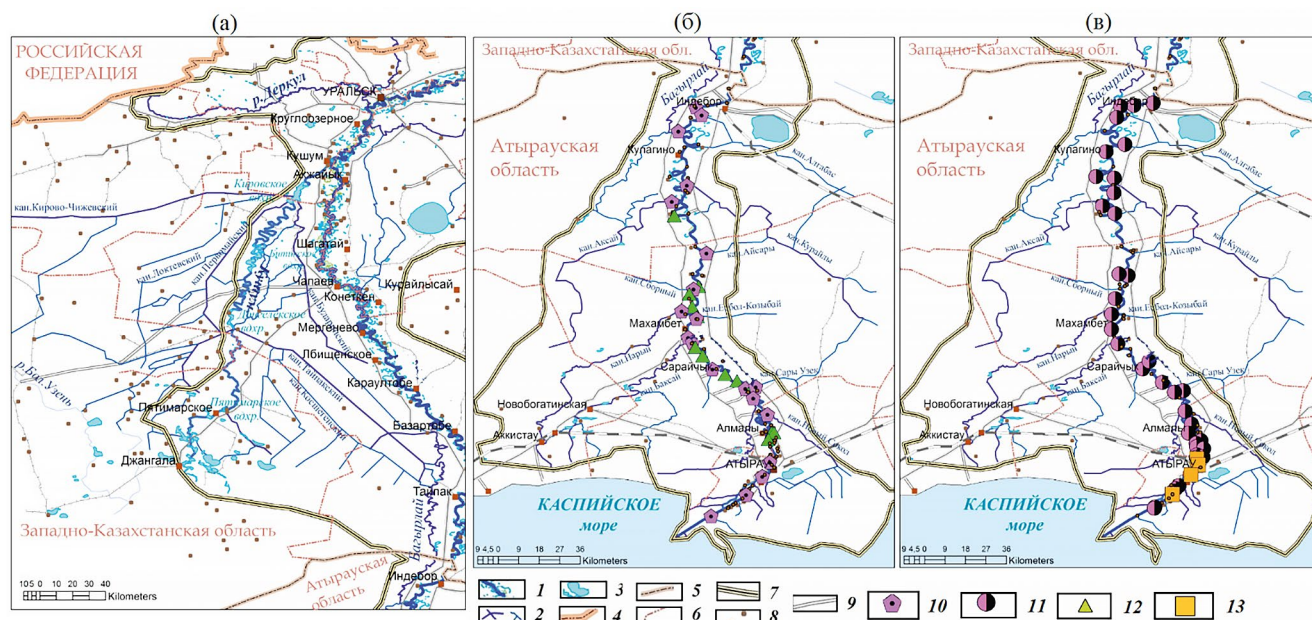


Рис. 1. Казахстанский участок р. Урал с пойменно-старичным комплексом, населенными пунктами, водозаборами и каналами, дорожной сетью. 1 — р. Урал и канал Кушум с пойменно-старичным комплексом (а), 2 — каналы и притоки, 3 — водоемы, 4 — государственная граница, 5 — граница между областями, 6 — граница между районами, 7 — границы бассейна р. Урал, определенные авторами, 8 — населенные пункты, 9 — транспортная инфраструктура; тип водозабора (рис. б и в): 10 — подача насосной станцией в канал, 11 — водоснабжение сельских поселений, 12 — сельхозпредприятий, 13 — городов и крупных промышленных предприятий.

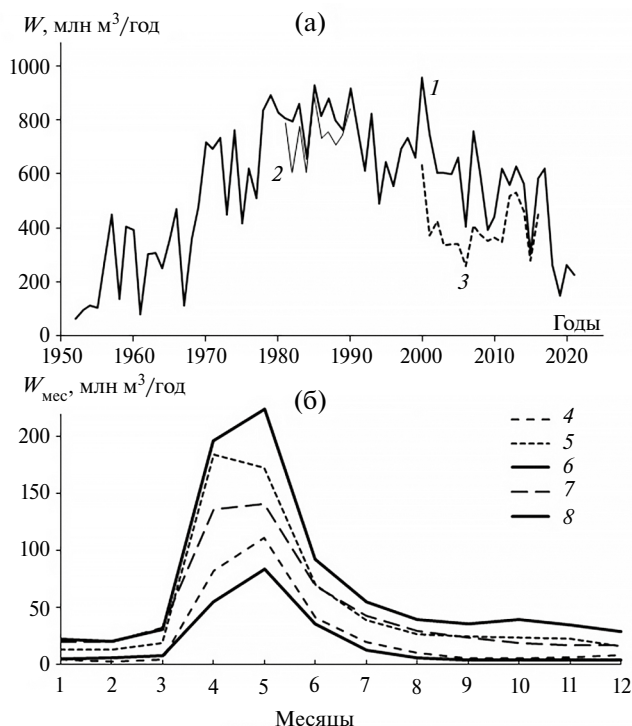


Рис. 2. Многолетний (а) и внутригодовой (б) режим забора уральских вод в Кушумский канал. По данным: 1 — гидрологических ежегодников [5, 6] и Казгидромета, 2 — [7], 3 — Западно-Казахстанского филиала “Казводхоза”; периоды: 4 — 1955–1969, 5 — 1970–1977, 6 — 1978–1993, 7 — 2002–2017, 8 — 2018–2021 гг.

дий [27] — и, конечно, ухудшение технического состояния гидротехнических объектов. Явное снижение отмечено во все месяцы года (рис. 2). Характерно, что внутригодовой водный режим Кушумского канала соответствует гидрографу реки: основной водозабор осуществляется в половодье.

В настоящее время в Урало-Кушумской ООС проводятся масштабные работы по ее модернизации; планируется больше уральских вод перебрасывать в бассейн р. Большой Узень. В то же время отсутствует информация о мерах по уменьшению потерь воды на испарение и фильтрацию в грунты, на перевод транспортировки речных вод из открытых, с земляным руслом, каналов в закрытые водоводы. Эти потери могут достигать 40% [35]. Таким образом, это сохраняет положение Урало-Кушумской ООС как самого крупного водопотребителя в бассейне р. Урал с безвозвратным изъятием речных вод [8, 17, 20].

Третий участник водохозяйственного комплекса — водоснабжение сельских населенных пунктов и сельхозугодий районного значения. Правда, насосных станций, забирающих воду из р. Урал, удалось обнаружить лишь у менее чем пяти сельских поселений. Хотя в 1980-е гг. их было существенно больше. В основном водоснабжение таких поселений на правобережье идет из каналов Урало-Кушумской ООС и подземными водами, на левобережье — из водоводов, перебрасывающих подземные воды.

Четвертый водопотребитель — это Жайык-Шалкарский канал на левом берегу Урала. Построен в 1978 г.; берет начало у с. Акжайык. Вода подается принудительно — насосными станциями в объеме $<1.5 \text{ м}^3/\text{с}$. В 2010-е гг. практически не функционировал. В 2022–2023 гг. прошел реконструкцию с доведением максимального расхода до $7 \text{ м}^3/\text{с}$. Работа насосной станции и канала сезонная — с мая по сентябрь–октябрь.

Всех этих данных хватило, чтобы приблизительно рассчитать средние потребности в воде водохозяйственного комплекса ЗКО, связанного с р. Урал, по двум вариантам (табл. 1). Вариант 1а отражает современные условия водопотребления с водозабором в Кушумский канал на уровне 2002–2017 гг. Вариант 2а, или максимальный, подразумевает: 1) возврат для Кушумского канала к показателям 1970–1980-х гг.; 2) максимальный забор воды Жайык-Шалкарским каналом; 3) гипотетический перевод населения и коммунальных предприятий 64 сельских поселений на речную воду. По немногочисленным собранным фактическим данным, водообеспечение на 1 чел. в сельских поселениях ЗКО сравнительно небольшое — от 70 до 130 л/сут. Это почти в 2–2.5 раза меньше, чем в Атырауской области, где поселения снабжаются речными водами. В то же время, согласно Постановлению Акимата ЗКО № 4049 от 18.08.2015 г. [41] и СНИП РК 4.01-02.2009 [45], суточное водопотребление должно стремиться к 150/210–270/280 л/сут для домов с централизованным горячим водоснабжением, 80/100–150 л/сут для домов с водопроводом и канализацией без ванн, с автономной системой горячего водоснабжения, 40 л/сут при разборе воды из колонок. Это — основа для расчета суммарного водопотребления сельским населением.

ем в будущем при знании его численности. По состоянию на 2009 г. число сельских жителей достигало ~73 тыс. чел. (к сожалению, новых сведений найти не удалось). Улучшение обеспечения населения питьевой водой, модернизация систем водоснабжения действительно происходят. Если в 2000 г. обеспеченность населения водой составляла 31%, то в 2020 г. уже 88.4%. К 2025 г. этот показатель в ЗКО планируют довести до 100%.

Если сравнивать текущий уровень водопотребления (вариант 1а) с “Лимитами водопользования для ЗКО на 2016–2025 гг.” (669 млн м³), утвержденными Приказом Правительства РК № 367 от 19 августа 2016 г. [42], то он их не превышает. Но максимальный расчетный уровень превысил бы Лимиты в 1.38 раз (табл. 1).

Современное водопользование в Атырауской области

В Атырауской области (АО) в 2014–2017 гг. почти 99% водопотребления осуществлялось за счет речных вод [32]. Как и в ЗКО, водозабор практически безвозвратный. По объемам водопотребления лидируют промышленность и сельское хозяйство, далее следуют коммунальное хозяйство и предприятия рыбного хозяйства.

Самые крупные водопотребители находятся в г. Атырау. Здесь пять водозаборных и водоочистных станций стационарного типа в ведении городского коммунального предприятия “Атырау Су Арнасы”. Часть воды перебрасывается по магистральному водоводу в пос. Макат и далее. Крупные промышленные предприятия, такие как Атырауский НПЗ и Атырауская ТЭЦ, имеют собственные водозаборные сооружения. Общий забор воды из реки предприятием “Атырау Су Арнасы” на хозяйственно-питьевые цели на рубеже 2010–2020-х гг. составлял ~25 млн м³/год (или 70–75 тыс. м³/сут, или 322 л/сут на 1 чел.). Максимальный забор воды, вероятно, может достигать 33 млн м³/год [30]. В 2009 г. в г. Атырау потребление питьевой воды населением было 12 млн м³/год (165 тыс. чел.), в 2012 г. — 15 млн м³/год (183 тыс. чел.). На производственные нужды предприятия забирается дополнительно 38.6 млн м³/год [50]; т. е. суммарный водозабор может достигает

54 млн м³/год. Его планируют постепенно увеличить до 84 млн м³/год, из которых 33 млн м³ пойдет на хозяйственно-питьевые цели. Отведение использованной воды в правобережной и левобережной частях города проводится отдельными системами — на поля испарения и в водоемы-накопители. В 2015, 2016 и 2017 гг. отводилось 15.46, 18.03 и 18.43 млн м³/год, причем 30% пришлось на промышленные сбросы и 70% на хозяйственно-бытовые.

Следующий, второй, крупный потребитель речных вод в АО — это сельские поселения. Таких пунктов вдоль реки 42 (рис. 1). В них, по состоянию на 2018 г., проживало почти 117 тыс. чел., что на 22 тыс. больше, чем в 2009 г. Хозяйство и инфраструктура сельских поселений включают объекты социальной сферы и разных служб: коммунальные предприятия, малые предприятия торговли и по оказанию разного рода услуг, иногда небольшие фермы, частные дома с приусадебными участками и домашним скотом, редко — многоквартирные дома.

Воду в села, поселки и аулы подают небольшие по мощности плавучие насосные станции. Их обнаружено (во время экспедиции и по спутниковым снимкам) 44. Еще 13 станций относятся к девяти садоводческим товариществам. Речная вода проходит водоподготовку на локальных водоочистных станциях, имеющих во многих населенных пунктах. Далее вода подается на водонапорные башни или в цистерны, откуда централизованно распределяется по потребителям. В сельском населенном пункте могут функционировать две системы централизованного водоснабжения — летний водовод и сети постоянного водоснабжения. Летние водоводы используются для полива технической водой огородов, садов и для водопоя скота; они функционируют в теплый сезон года по несколько часов в день, представлены одной и несколькими небольшими насосными станциями первого подъема, характеризуются отсутствием водоподготовки и не спрятанными в землю трубами.

Практически все системы водоснабжения прошли модернизацию в 2002–2009 и 2013–2017 гг. либо были впервые построены, как, например, станции водоподготовки [19].

Важной проблемой, ждущей своего решения, остается практически повсеместное отсутствие канализационных сетей и очистных станций. Исключение — г. Атырау и некоторые поселки вблизи него, а также поселки Индербор, Сарайшык и Махамбет. Сейчас стоки поступают в выгребные ямы и септики. Переполнение ям устраняется с помощью спецтехники.

Третий важный субъект водохозяйственного комплекса — это каналы различных оросительных и обводнительных систем (рис. 1), которые забирают уральскую воду с помощью более мощных плавучих насосных станций. После сброса воды в магистральный канал она течет под уклоном в земляных руслах, распределяется по меньшим по размеру каналам и поступает на обводняемые угодья. Каналы могут также служить источником воды для удаленных от реки населенных пунктов. Системы функционируют с апреля—мая по сентябрь—октябрь, хотя вода в них может сохраняться и зимой. Самые крупные каналы и их подсистемы: на правом берегу — Багырлай, Аксай, Сборный, Нарын и Баксай, Черная Речка; на левом — Алгабас-Жорык, Курайлы, Новый Сокол, ерик Мостовой и Перетаска. Всего выявлено 20 водозаборов в такие каналы. Проектная пропускная способность главных каналов в основном — 1–2 м³/с. Но в Баксае и Нарыне она достигает 21 м³/с. Правда, в июле 2019 г. участники экспедиции измерили существенно меньшие расходы воды.

Четвертый водопользователь — Урало-Атырауский осетровый рыболовный завод, выращивающий осетрового малька, и аквакультурное хозяйство по товарному производству осетровых пород рыб и икры. Оба они находятся в дельте Урала. В 2007–2009 гг. они использовали всего 4.1 млн м³ воды, причем с возвращением ее в реку.

Оценка современного водозабора из р. Урал в пределах Атырауской области, его разных вариантов проводилась иначе, чем для ЗКО. В основе ее, прежде всего, — данные экспедиционных изысканий в 2019 г., а затем уже сведения о размещении, типе и мощности каждого из водозаборов, о пропускной способности и внутригодовом режиме работы каналов, численности

населения, количестве домовых хозяйств и наличии летнего водовода в сельских населенных пунктах, открытые водохозяйственные данные по г. Атырау и некоторым сельским поселениям. Расчет выполнялся нарастающим итогом от одного водопотребителя к следующему, находящемуся ниже по течению. Забор воды каналами оценивался только для вегетационного сезона с учетом режима их работы в 1981–1985 гг., сведения об этом опубликованы в [5]. Подробно методика расчетов и примененные решения раскрываются в [21].

По итогам изысканий в 2019 г. и по расчетам, объемы забора воды на атырауском участке Урала составили 144 млн м³/год (вариант 1б), или 2.5% годового объема стока за 2010–2018 гг. на посту Индербор. Это явно меньше “Лимитов использования уральских воды” (302 млн м³/год), утвержденных для Атырауской области Правительством РК [42]), и не может приводить к водному дефициту. Внутригодовое распределение водопотребления для варианта 1б приведено в табл. 1.

Вариант 2б подразумевает доведение суммарного объема водопотребления до 302 млн м³/год (табл. 1). Вариант 3б предполагает: 1) забор воды в каналы в июне, близкий по своей величине к максимальной пропускной способности канала; 2) схожее с показателями 2019 г. водопотребление сельскими населенными пунктами (оно больше нормативной величины — 150 л/сут на 1 чел.); 3) водопотребление предприятиями в г. Атырау — на уровне утвержденных Правительством Казахстана лимитов.

ОЦЕНКА ПОТРЕБНОСТЕЙ В ВОДЕ РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА

Река Урал официально судоходна от моря до г. Оренбурга. Регулярное сообщение между городами Гурьевом и Уральском открылось в 1916 г., хотя первые суда здесь начали ходить еще в конце XIX в. В СССР оно возобновилось в 1927 г., а с 1932 г. открылось сообщение до г. Оренбурга. В 1943 г. были составлены первые лоцманские карты, обновленные в 1950–1960-х гг. Развитие отрасли продолжалось до 1970-х гг., но одновременно стали нарастать и проблемы. В 1960-е гг.

Таблица 1. Величины расчетного месячного и годового стока р. Урал (на границе России и Казахстана), млн м³, и его отраслевая структура

Вариант	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Водозабор в Западно-Казахстанской области													
1а	21.1	20.8	33.2	137	146	74.2	48.1	33.2	26.8	21.3	18.4	17.6	598
2а	24.1	21.8	32.1	198	241	112	73.3	54.9	48.7	47.6	36.4	30.4	920
Водозабор в Атырауской области													
1б	6.0	5.4	6.5	10.9	18.2	20.5	19.4	17.1	14.4	11.0	8.5	6.4	144
2б	12.8	12.9	14.5	23.4	36.6	42.5	38.8	35.1	29.2	22.4	18.5	13.9	301
3б	12.5	11.3	21.2	66.3	134	163	144	126	96.3	61.7	41.4	18.5	896
Сток для поддержания гарантированных глубин (для судоходства)													
1в	0	0	0	0	161	156	161	161	156	161	0	0	956
2в	0	0	0	0	375	363	375	375	363	375	0	0	2226
Минимально допустимый (санитарный) сток													
1г	29.0	20.2	19.3	410	640	190	100	70.2	59.2	56.0	60.0	41.1	1695
Весенний сток, оптимальный для икhtiофауны и почвенно-растительного покрова поймы													
1д	0	0	0	1400	4770	1370	0	0	0	0	0	0	7540
2д	0	0	0	1140	3810	1100	0	0	0	0	0	0	6050
3д	0	0	0	1590	2420	565	0	0	0	0	0	0	4575
Суммарный сток для казахстанского участка р. Урал*													
0	56	46	59	558	804	285	168	161	156	161	87	65	2606
	95	95	93	98	96	98	98	89	87	83	99	98	99
	66	55	66	1810	2700	720	212	161	156	161	115	85	6310
1	93	90	90	51	55	60	93	89	87	83	93	95	70
	81	74	74	35	55	58	87	81	74	71	84	87	52
	66	55	66	1360	4090	1250	212	161	156	161	115	85	7780
2	93	90	90	63	31	19	93	89	87	83	93	95	52
	81	74	74	52	32	23	87	81	74	71	84	87	48
	66	55	66	1620	5050	1525	212	161	156	161	115	85	9270
3	93	90	90	54	22	12	93	89	87	83	93	95	37
	81	74	74	42	26	16	87	81	74	71	84	87	35

*Во второй строке – процент исполняемости за 1938–2020 гг., в третьей – за 1938–1968 гг.

прекратилось регулярное движение на участке с. Рубежинское – г. Оренбург. В 1970-х гг. из рыбоохранных соображений была запрещена эксплуатация глиссирующих пассажирских теплоходов, а с 1982 г. – уже глубокоосидающих судов. Эти решения, сильное маловодье 1970-х гг. (рис. 3а, 3б) и сложная экономическая ситуация в 1990-х гг. привели к деградации отрасли. В 1995 г. грузоперевозки прекратились вовсе.

В XXI в. Правительство РК пыталось реанимировать судоходство. Издано несколько постановлений, утверждены программы развития транспортной отрасли (№ 105 от 29.01.2004, № 917 от 26.09.2006, № 1055 от 31.12.2019 г. и др. [49]), но речной транспорт так и не стал полноценным субъ-

ектом водохозяйственного комплекса. И причин здесь, помимо выше перечисленных, несколько. Судоходство на р. Урал всегда лимитировали многочисленные отмели, быстрое от года к году изменение судоходной обстановки ввиду интенсивных русловых переформирований, низкие уровни во время длительной межени и, как ни странно, высокие уклоны и скорости течения. Число перекатов между г. Уральском и п. Калмыково почти 80, ниже по течению – их еще 17 [15]. В межень глубины на лимитирующих перекатах падают до 0.5–0.8 м при гарантированных глубинах судового хода 0.9–1.0 м [35]. Были случаи простоя всего флота, например в 1967, 1975 и 1977 гг., из-за очень низких уровней воды (рис. 3а, 3б). Возможно, похожие случаи были в очень маловодные 1951, 1954

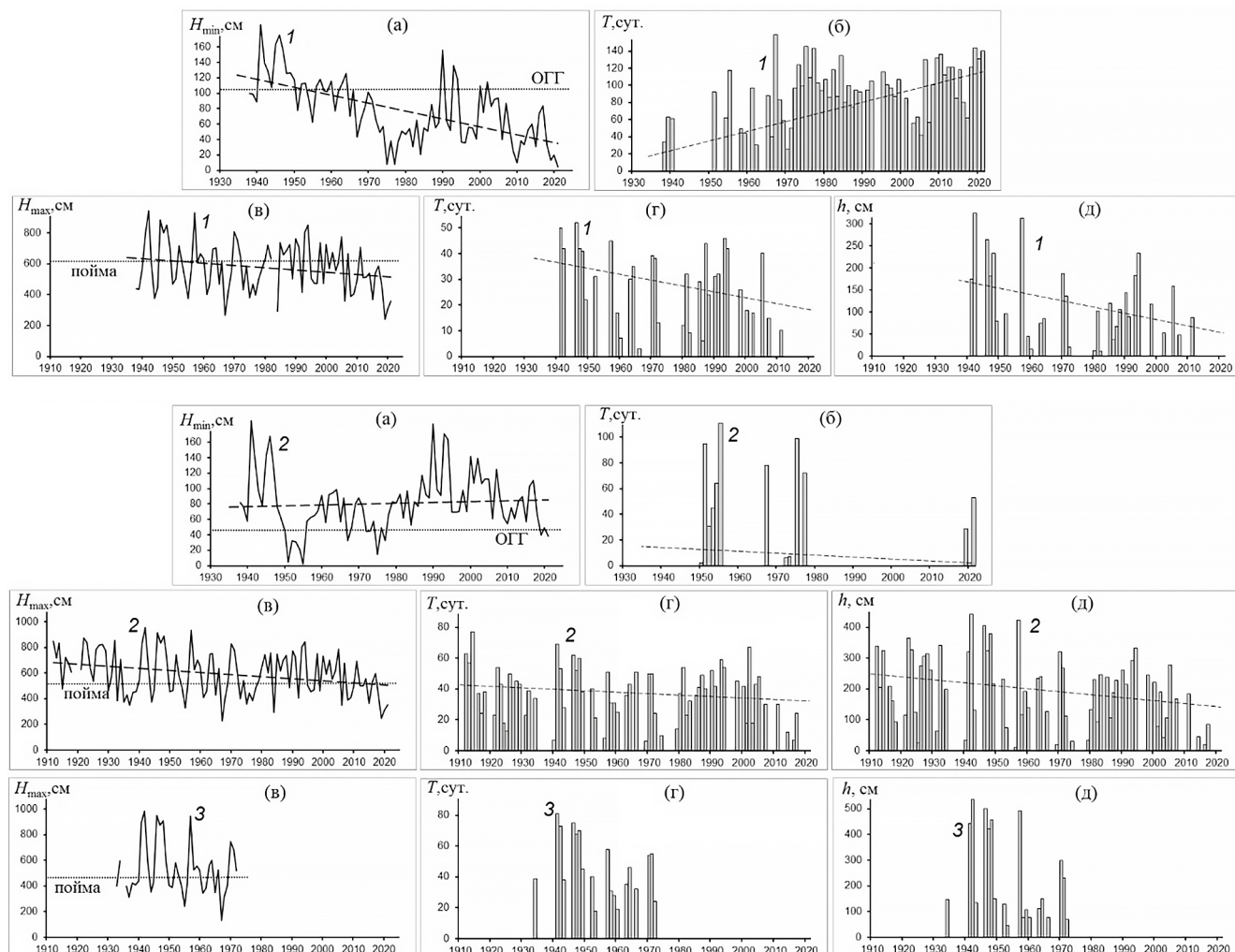


Рис. 3. Многолетние изменения минимального (за навигационный сезон) уровня воды (а), продолжительности стояния уровня ниже отметки гарантированных глубин в навигационный сезон (б, ОГГ), максимального уровня (в), продолжительности (г) и глубины (д) затопления поймы р. Урал на постах Уральск (1), Кушум (2) и Тополы (3) (с 1933 по 1974 г.) с линейными трендами.

и 1955 гг. В устье реки уровни межи тесно связаны с колебаниями среднего уровня моря и стгно-нагонными явлениями [38]. Гарантированные глубины здесь должны быть больше — 1.2–1.5 м, так как это необходимо для прохода речно-морских и морских судов.

Зарегулирование стока Урала водохранилищами, с одной стороны, сократило продолжительность и водность половодья, с другой — увеличило средний расход летне-осенней межи с 83 до 117 м³/с и в целом ее водность [19]. Но минимальные уровни отреагировали неоднозначно: на посту Уральск они понизились почти на 0.6 м, вероятно, под воздействием русловых перестроений, а на посту Кушум выросли на

5 см (рис. 3а). Причем в последнем случае многолетний ход уровней совпал с колебаниями меженных расходов воды не только в Кушуме, но и в Оренбурге. Кроме того, сопоставление гидрологических данных с независимыми данными о состоянии речной навигации на нижнем Урале показало, что проблемы возникали именно в те годы, когда уровень воды опускался ниже неблагоприятной отметки именно в Кушуме. А это было не так часто и не так продолжительно, как на посту Уральск (рис. 3а). Поэтому серьезное снижение уровней на посту Уральск с середины 1960-х гг. и рост продолжительности периода с уровнями ниже неблагоприятной отметки не свидетельствуют о катастрофическом ухудшении условий для судоходства.

Еще одна причина “гибели судоходства” — слабые конкурентные преимущества речного вида транспорта в сравнении с автомобильным и железнодорожным, чьи дорожные сети дублируют друг друга и нижний отрезок Урала (рис. 1). Сказалось и недофинансирование отрасли. Тем не менее несколько мероприятий — углубление Урало-Каспийского канала в устье реки и модернизация порта Атырау — были реализованы, поскольку это часть мер, касающихся устойчивого транспортного снабжения нефтедобычи на каспийском шельфе.

Основные порты на нижнем Урале — это Уральск и Атырау; в сельских поселениях корабли швартуются к пристаням.

Чтобы оценить минимально необходимые для водного транспорта расходы воды, необходимо знать гарантированные глубины и период навигации. Согласно [31], гарантированные габариты судового хода поддерживаются при уровне 105 см на посту Уральск, на посту Кушум — 45 см, Тополи — минус 10 см. На устьевом взморье, согласно Атыраускому филиалу Казгидромета [4], критическими, опасными и особо опасными уровнями считаются 40 см, 20 см и минус 30 см над нулем поста Атырау. Эти проектные уровни, вероятно, актуальны и в настоящее время, так как, по словам директора Уральского судостроительного завода [48], для прохода грузовых судов требуется уровень 110–140 см (на посту Уральск). Даты наступления этих горизонтов зависят от сроков окончания весеннего половодья и в среднем приходятся на 27 и 31 июля для отметок в 110 и 105 см. Причем с 1973 г. произошел существенный сдвиг в сторону более раннего начала этого неблагоприятного (для навигации) периода: 1938–1972 гг. — 25 и 17 августа, 1973–2021 гг. — 18 и 20 июля (пост Уральск). Предприятием “Водные пути Казахстана” сроки навигации определены с 20 апреля по 31 октября для реки и 1 апреля — 22 ноября для Урало-Каспийского канала.

Отметкам 105 см на посту Уральск и 45 см на посту Кушум соответствуют расходы воды на посту Январцево в 140 м³/с (вариант 2в) и 60 м³/с (вариант 1в), полученные с учетом времени добегания, или месячные объемы стока в 363–375

и 156–161 млн м³, или 2226 и 954 млн м³ за сезон с мая по октябрь (табл. 1). Важно понимать, что этот сток не изымается из реки.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА

Общие вопросы

Одним из важных, но нормативно не утвержденным участником водохозяйственного комплекса казахстанского участка р. Урал следует считать рыбное хозяйство и природоохранную отрасль. Речь идет о поддержании биопродуктивности и биоразнообразия пойменных природных комплексов, воспроизводстве основных представителей ихтиофауны. Обеспечение этих условий требует повышенных расходов воды в определенный период года. Во время половодья: 1) происходит затопление речной поймы, благотворно влияющее на состояние почвенно-растительного покрова и на продление “жизни” пойменных водоемов; 2) обводняются нерестилища рыб с сохранением в течение необходимого времени нужных глубин и скоростей течения, промываются зимовальные ямы; 3) промывается и очищается от мусора русло, удаляются накопившиеся в донных отложениях загрязняющие вещества. Однако это довольно большие объемы стока, к тому же, как правило, в период наполнения водохранилищ. Они до сих пор научно не обоснованы и нормативно не закреплены. Одна из причин — разные мнения по выбору методики определения таких расходов воды.

В СССР, а затем в России и странах СНГ вопросами экологического стока занимались Б.В. Фащевский, В.Г. Дубинина и их коллеги [9–11, 39]. Ими научно обоснована и введена в употребление своя система понятий, обозначающих некое обязательное количество воды в реке, остающееся от естественного стока, которое необходимо для обеспечения экологического благополучия водного объекта, его обитателей и околородных экосистем, сохранения восстановительного потенциала экосистемы, а также для поддержания необходимых условий водопользования. Систематическое снижение стока воды ниже этих величин ведет к тем или иным негативным последствиям. При обосновании критических расходов воды предлагались

два подхода. Первый предполагал исследование связей биологических и гидрологических показателей состояния водной и околоводной экосистем (в естественных условиях), позволявших обосновывать пороговые величины стока, уровни воды, скорости течения (0.5–0.6 м/с) и другие гидрологические характеристики. Это — наиболее обоснованный подход, адаптируемый под конкретную реку, но требующий большого массива гидрологических и редких данных о состоянии биоценозов за многолетний период. Хороший пример таких связей приведен для нижнего Дона в [11] и для р. Шу в [24]. Второй подход как упрощение первого и более универсальный может ограничиться использованием лишь гидрологических данных. Экологический сток (ЭС) определяется так:

$$\text{ЭС} = \text{ЕС}(p\%) - \text{ДИ} = \text{ЕС}(p\%) - (\text{КС}(p = 97\%) - \text{ИС}(p = 99\%)), \quad (1)$$

ЕС — естественный сток, привязанный к обеспеченности ($p\%$) или различной водности; ДИ — объемы допустимого безвозвратного изъятия речных вод, после которых в реке сохраняются условия устойчивого и безопасного функционирования водных и околоводных экосистем; КС — критический (для экосистем и гидрографических объектов) сток; ИС — исторически минимальный объем стока, принимаемый для условий 99%-й обеспеченности. В случае неизвестности связей между биологическими и гидрологическими параметрами экосистем разрешено принимать КС 97%-й обеспеченности. В [1] КС найден следующим образом: вначале определен расход воды, выше которого начинается затопление поймы; затем определен объем стока половодья для лет, когда этот расход не превышался (КСП), затем — соответствующий ему критический годовой объем стока (КСГ+КСП) и его обеспеченность КСГ. ДИ принимается постоянным для различной водности с объемом стока выше базового стока ($\text{БС} = \text{КС} + \text{ДИ}$). В маловодные годы со стоком ниже БС и даже КС безвозвратное изъятие разрешается, но лишь для обеспечения приоритетных водопотребителей.

Внутригодовое распределение ЭС в годы различной обеспеченности рассчитывается в соответствии с гидрографом условно-естественного стока. Причем, если в отдельные периоды расчет-

ное безвозвратное изъятие приводит к ИС, его необходимо снизить. Предложения В.Г. Дубининой и др. в [1] использованы при составлении “Методических указаний по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты” [23]. Массово они реализованы при составлении бассейновых СКИОВО — в середине 2010-х гг.

Для казахстанского участка Урала расчеты экологического стока выполнены и опубликованы в работе [24], но использован подход, базирующийся только на гидрологических данных, без учета гидрологических и водно-биологических особенностей нижнего Урала. Согласно расчетам, экологический сток за год для обеспеченностей 25, 50, 75 и 95% равен соответственно 8.76, 6.3, 4.0 и 3.45 км³. Дано его распределение по месяцам. Но опорным постом выбран Кушум, хотя между ним и границей РФ—Казахстан находятся главные водопотребители — Кушумский канал, водозаборы г. Уральска, а также несколько притоков. В [35] приведены среднемноголетние показатели воспроизводства белуги, осетра и шипа за период 1990–2006 гг., увязанные с водностью года. Отмечено, что наиболее низкая эффективность воспроизводства осетровых пород рыб фиксируется при объеме годового стока в среднем <3.5 км³. Интересно, что величина стока в [35] очень близка к той, которая приведена в [24], и соответствует 95%-й обеспеченности. В маловодные годы проход на нерест белуги, осетра и шипа уменьшается в среднем на 52, 57 и 38% по сравнению с многоводными годами, средняя масса скатившейся обратно в море молоди — соответственно на 25, 29 и 74%.

Есть еще одно важное понятие в системе терминов, относящихся к экологическому стоку, — это минимально допустимый расход воды, который должен оставаться в реке для поддержания водных объектов в состоянии, соответствующем экологическим требованиям. Для нижнего бьефа водохранилищ его обозначают как “санитарный попуск”. О нем говорится в СанПиН 3907-85 и в письме Министерства природных ресурсов РФ от 17.01.1997 г. “О Временных методических рекомендациях по установлению минимально допустимых расходов воды” [43]. Во втором документе указано, что “...при отсутствии обоснований для рек или их участков, имеющих рыбохо-

зайтвенное значение, минимально допустимые расходы воды принимаются для меженного периода не ниже минимального месячного расхода 95% обеспеченности, а для периода половодья не ниже 75% от месячных расходов низкого половодья 95%-й обеспеченности по объему, но не менее минимально допустимого расхода для меженного периода...". Важно, что, согласно [24], в Казахстане это правило тоже действует.

Расчет минимально допустимого стока

При расчете минимально допустимого стока использованы рекомендации МПР РФ [43] для рек или отдельных участков, имеющих особо важное рыбохозяйственное значение. Вначале методом реального года было рассчитано внутри-годовое распределение стока по месяцам для года 95%-й обеспеченности. При этом использованы месячные данные за 1938–1968 гг. (условно-естественный период), объединяющие сток рек Урал (пост Оренбург), Сакмары (Каргала), Илек (Чилик), Утвы (Григорьевка) и Киндели (Магнитострой), т. е. с территории 154.5 тыс. км²; причем месячные расходы воды пересчитаны с учетом времени добегания до поста Январцево – по среднесуточным расходам воды. Для постов Оренбург и Каргала это время составило 11–12 сут, для Чилика – в среднем 7–8 сут. К этому стоку был добавлен сток с водосбора (~18900 км²), расположенного между упомянутыми постами и государственной границей (пост Январцево), рассчитанный по методике для случаев отсутствия данных и для $p = 95\%$. Для расчета минимально допустимого стока во время половодья (IV–VI) объединенные месячные объемы перемножались на 0.75. Итоги расчета минимально допустимого, по сути – базисного, экологического стока, ниже которого подачу воды в русло нижнего Урала нормативно снижать не рекомендуется, приведены в табл. 1. Это вариант 1г.

Расчет стока, необходимого поймам и нерестилищам осетровых пород рыб

Базисный экологический сток не способствует нормальному воспроизводству осетровых и обводнению поймы. Достижение этих целей возможно лишь при больших и продолжительных расходах, прежде всего во время половодья.

Согласно данным Института степей УрО РАН (г. Оренбург) [29], их обновленной (в 2023 г.) версии и сведениям из [26], выше г. Уральска расположено 24 нерестилища (по состоянию на 1981–1982 гг.), от г. Уральска до дельты – 68. Их местоположение известно. Причем эффективными нерестилищами считаются русловые, сложенные средним и крупным аллювием, с комфортными скоростями течения. Выше г. Уральска площадь русловых нерестилищ равна 77% общей, ниже по течению доля русловых нерестилищ в 2016 г. была 82.5%; т. е. русловых нерестилищ большинство, и это обеспечивает приемлемый уровень воспроизводства осетровых пород рыб даже при низких половодьях. Остальные нерестилища размещаются на пойменных берегах и требуют затопления более высокими водами. Но маловодные годы неблагоприятны не только из-за исключения пойменных нерестилищ из процесса воспроизводства, но также, во-первых, по причине большего выедания другой рыбой икры, отложенной осетрами на русловых нерестилищах, поскольку в этом случае концентрация икринок на 1 га увеличивается [13]; во-вторых, из-за большей доли личинок в общем числе скатывающейся в море осетровой молоди, так как личинки менее приспособлены к морской воде.

Период, в течение которого требуются повышенные расходы воды, начинается с момента подхода осетра к устью Урала, реагирующего на весеннее распреснение взморья и нагрев воды, и с захода рыбы в реку. Массовый весенний ход русского осетра, самого распространенного (наряду с севрюгой) здесь представителя осетровых, происходит в среднем во второй половине апреля – первой декаде мая [13]. Помимо времени на проход рыбы вверх по течению реки (до нерестилищ), расчетный период включает в себя время на откладывание икры (в среднем 5–10 сут), развитие предличинок (примерно 10–14 сут) и скатывание к морю, которое начинается с середины мая. Необходимо понимать, что есть и другие формы осетровых пород рыб, которые нерестятся в другие сезоны года. Но весенняя форма самая многочисленная.

Построены зависимости количества скатившейся к устью Урала молоди и прошедших

сверху по течению на нерест производителей осетра от сумм среднемесячных расходов воды за апрель–июнь на посту Январцево (рис. 4). Суммы расходов воды получены расчетным путем, т. е. использован тот же ряд, что и при решении предыдущей задачи. Рыбохозяйственные показатели заимствованы из [12, 13]. Они охватывают период с 1972 по 2009 г. – с антропогенно нарушенными условиями воспроизводства осетровых, но вне современного маловодного периода. Построенные зависимости оказались неоднозначными, и высокоурожайные и урожайные условия для осетра (с обеспеченностью поголовья производителей и малька в диапазонах <25 и 25–50%, по рекомендациям из [11]) достигаются в определенных диапазонах суммарного за апрель–июнь водного стока. Они соответствуют обеспеченностям объемов стока за половодье в среднем 20–70 и 15–90% (для условий естественного стока). Пик достигается при обеспеченностях примерно 30–45%, т. е. в средние по водно-

сти половодья. Второй вывод – численность производителей осетра, прошедших на нерест, с 1994 г. явно сократилась. И причина – не в малой водности реки и низких половодьях, поскольку маловодный период начался намного позже, а в браконьерском вылове в постсоветское время [13]. Это положение стало исправляться административными мерами лишь в XXI в., но с 2008 г. ухудшились гидрологические факторы воспроизводства – наступило длительное маловодье. Третий вывод как развитие предыдущего тезиса следующий: между численностями производителей и скатившейся молодежи до 1994 г. существовала вполне определенная прямая связь. После она нарушилась.

Еще один природный водопользователь – это обширные поймы нижнего Урала (с древними дельтами) и их экосистемы [15, 31, 40]. Сокращение продолжительности, площади и частоты затопления поймы ухудшает плодородие почв, снижает продуктивность и видовое разнообразие пойменных фитобиоценозов [2, 16, 34]. Причем в засушливых районах и на засоленных отложениях Прикаспийской низменности негативный эффект усиливается. Но каких-либо, даже общих, рекомендаций и тем более предметных научных исследований в отношении критических и оптимальных параметров затопления поймы р. Урал обнаружить не удалось. И, вероятнее всего, единого мнения в этом вопросе быть не может, поскольку велика роль местных факторов. Тем не менее некоторые решения выработать можно, если взять за основу результаты исследований связи параметров лиманного орошения с продуктивностью естественных сенокосов в похожих по своим физико-географическим условиям районах. Такие ценные сведения почерпнуты из работ [3, 14, 16, 22, 25, 28, 33, 37]. По итогам анализа этих и других работ, из бесед со специалистами следует, что минимальный срок затопления поймы – 4–7 сут, максимальный – 30–40 сут. Оптимальная продолжительность затопления, вероятно, находится в диапазоне от 20 до 30 сут. Такой режим затопления допускает существование большинства кустарников, древесных пород (редких для этой природной зоны) и пойменного травостоя. В то же время, если лиманы как элемент гидротехнической системы можно опорожнить довольно быстро, то освободи-

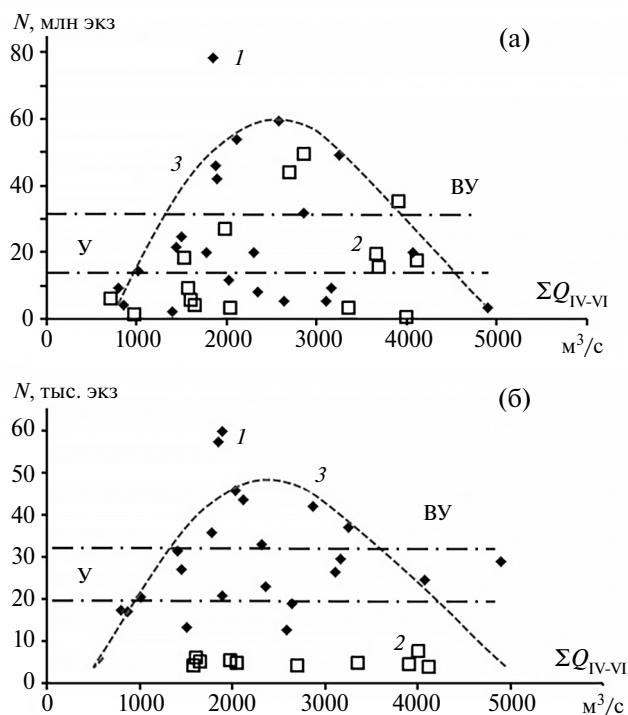


Рис. 4. Зависимости количества скатившейся в устье р. Урал молодежи (а) и прошедших на нерест (вверх по течению) производителей осетра (б) от суммы среднемесячных расходов воды за апрель–июнь на посту Январцево. Данные по осетровым за 1972–2009 гг. взяты из работ [12, 13]. 1 – данные до 1993 г., 2 – данные начиная с 1994 г., 3 – верхняя огибающая; ВУ – высокоурожайные, У – урожайные условия.

ждение поймы от разлившихся речных вод — это инерционный природный процесс, человеком неконтролируемый. Поэтому продолжительность затопления поймы, определяемую по положительной разности уровня в реке и отметки бровки поймы, следует закладывать меньше, возможно, начиная с 10–15 сут. Рост температуры воздуха и вышедшей на пойму воды требует снижения продолжительности и глубины затопления. Особенно неблагоприятен этот фак-

тор в конце затопления. Оптимальная глубина затопления начинается от 0.1–0.3 м. Наиболее оптимальным и экономически целесообразным для затопления пойменных лиманов признается сток 25%-й обеспеченности.

Чтобы оценить необходимые расходы воды непосредственно в низовьях р. Урал, были определены высотные отметки начала затопления поймы на участках постов. Источником данных

Таблица 2. Характеристики затопления поймы р. Урал в пределах Республики Казахстан

Характеристика	Число лет с затоплениями	Повторяемость, %	Продолжительность*, сут	Дата*	Глубина затопления*, см
пост Уральск, 1938–1974 гг.					
Средняя	16	43	32	22 апреля	140
Наибольшая/год	-	-	52 / 1946	13 мая / 1966	325 / 1942
Наименьшая/год	-	-	3 / 1966	27 март / 1947	1 / 1966
пост Уральск, 1975–2021 гг.					
Средняя	18	38	25	28 апреля	98
Наибольшая/год	-	-	46 / 1993	20 мая / 2007	233 / 1994
Наименьшая/год	-	-	6 / 1986	11 апреля / 1991	11 / 1982
пост Кушум, 1912–1918, 1921–1935 гг.					
Средняя	18	82	40	18 апреля	252
Наибольшая/год	-	-	77 / 1914	1 мая / 1918	364 / 1922
Наименьшая/год	-	-	13 / 1925	1 апреля / 1914	27 / 1925
пост Кушум, 1936–1974 гг.					
Средняя	23	59	37	18 апреля	209
Наибольшая/год	-	-	69 / 1941	11 мая / 1969	443 / 1942
Наименьшая/год	-	-	6 / 1969	26 март / 1947	11 / 1956
пост Кушум, 1975–2021 гг.					
Средняя	25	53	37	23 апреля	171
Наибольшая/год	-	-	67 / 2002	7 апреля / 2002	334 / 1994
Наименьшая/год	-	-	7 / 2016	20 мая / 1979	19 / 2016
пост Мергенево, 1942–1974 гг.					
Средняя	6	19	13	-	105
Наибольшая/год	—	—	22 / 1946		178 / 1942
Наименьшая/год	—	—	6 / 1947		4 / 1970
пост Калмыково, 1927–1943, 1948–1966, 1968–1969, 1971–1974 гг.					
Средняя	4	10	11	9 мая	115
Наибольшая/год	—	—	15 / 1957	-	187 / 1942
Наименьшая/год	—	—	6 / 1941	-	21 / 1941
пост Тополи, 1933–1934, 1936–1972 гг.					
Средняя	21	55	46	28 апреля	225
Наибольшая/год	—	—	81 / 1941	12 мая / 1958	536 / 1942
Наименьшая/год	—	—	18 / 1953	2 апреля / 1947	46 / 1953

*Расчет проводился с исключением лет, когда затопление поймы не происходило.

послужили сведения из гидрологических справочников, из публикаций [31, 36] и материалы Казгидромета. Для поста Тополи они определены автором настоящей статьи по кривым расходов. Выполнен расчет повторяемости, продолжительности и глубины затопления поймы путем сравнительного анализа графиков внутrigодовых колебаний среднесуточных уровней, построенных за каждый год, и критических отметок. Выяснено, что затопление поймы р. Урал происходило не каждый год: в среднем 1 раз за 2 года (рис. 3, табл. 2). На каких-то участках затопление наблюдалось чаще. За период 1912/1936–2021 гг. доминирует тенденция снижения повторяемости и масштаба затопления поймы. Причем оно фиксируется намного раньше пуска Ириклинского гидроузла – примерно с середины 1930-х гг. Именно в этот период резко снижается сток соседней Волги и падает уровень Каспия [38]. Новое резкое уменьшение соответствует началу современного глубокого маловодья – с 2008 г. Средняя продолжительность затопления поймы составляет 30–40 сут, максимальная – 2.0–2.5 мес. В верхней части рассматриваемого участка Урала затопление поймы начинается в середине–начале третьей декады апреля, в нижней – в конце апреля – начале мая.

В итоге, если принимать оптимальную продолжительность затопления поймы в диапазоне 20–30 сут, а глубины – от 0.5 до 1.0 м, то им будут соответствовать объемы стока за половодье обеспеченностью от 30 до 50% с учетом связей между параметрами затопления поймы и суммой месячных расходов воды. Если же рассматривать связи между показателями численности осетровой молоди и параметрами затопления поймы, то оказывается, что наилучшие условия формируются при затоплении поймы на 30 сут и глубиной до 1 м (p – 30–40%). Таким образом, установлено, что наиболее благоприятные экологические условия при учете интересов как водных, так и околотоводных экосистем соответствуют стоку половодья 30–50%-й обеспеченности. Поскольку не каждый год можно удерживать весенний сток на столь высоком уровне, обоснование диапазона благоприятных гидрологических условий позволяет более эффективно и с минимальным ущербом для ихтиофауны и почвенно-растительного покрова регулировать макси-

мальный сток. С учетом распределения стока по месяцам в годы с половодьем соответствующей обеспеченности рассчитан гидрограф с апреля по июнь для $p = 35\%$ (вариант 1д) и $p = 50\%$ (вариант 2д) (табл. 1). Также рассчитан вариант 3д для $p = 70\%$, т. е. когда пойма почти не затопляется, но поддерживаются урожайные условия для воспроизводства осетра.

ВАРИАНТЫ ГИДРОГРАФА РЕКИ УРАЛ НА ГРАНИЦЕ РОССИИ И КАЗАХСТАНА

Окончательный минимально допустимый гидрограф р. Урал на границе России и Казахстана (участок поста Январцево) должен включать: 1) минимально необходимый сток W_1 – вариант 1г; 2) объемы, необходимые участникам водохозяйственного комплекса Западно-Казахстанской и Атырауской областей, W_2 с учетом их современных потребностей – варианты 1а и 1б. В случае учета интересов судоходства к ним следует добавлять объемы W_3 , соответствующие варианту 1в, но только если $W_3 > (W_1 + W_2)$ и лишь на величину $\Delta W_3 = W_3 - (W_1 + W_2)$. Но это не приоритетная отрасль, хотя увеличение стока летом–осенью, когда $W_3 > (W_1 + W_2)$, благоприятно бы влияло на гидроэкологическую обстановку. В итоге получаем гидрограф с минимальным набором требований по воде, или вариант 0 с годовым стоком 2.61 км^3 (табл. 1), а без потребностей судоходства – 2.44 км^3 . Это меньше величины ЭС для $p = 95\%$, приведенного в [24, 35], т. е. это совсем “жесткий” вариант. В то же время этот вариант исполнялся с 1938 по 2020 г. в 96–98% случаев весной, в 83–98% – летом–осенью, в 93–99% – в холодный сезон.

Стандартный вариант включает: 1) большие объемы для участников водохозяйственного комплекса Западно-Казахстанской и Атырауской областей с учетом его потенциала и перспектив развития (варианты 2а и 2б); 2) минимальные объемы для судоходства (вариант 1в); 3) удовлетворение минимальных нужд природоохранной отрасли W_4 в виде варианта 3д. При этом, как и в случае с водным транспортом, действует следующее правило: $(W_1 + W_2)$ увеличиваем на ΔW_4 , которую находим как $W_4 - W_1$. Это – вариант 1 (табл. 1). Он практически соответствует ЭС ($p = 50\%$) из [24]. Этот вариант достигался со-

ответственно в 51–60, 83–93 и 70–95% случаев. В условно-естественный период исполняемость была хуже.

Вариант, предполагающий оптимум гидрологических условий для нормального воспроизводства осетровых и функционирования пойменных экосистем, базируется на варианте 1 с заменой варианта 3д на вариант 2д. Это вариант 2 (табл. 1). Его реализуемость довольно высокая – 19–63% (1 раз в 2–5 лет), 83–93 и 70–95% случаев соответственно весной, летом–осенью и зимой. Почти такой же она была и в условно-естественный период.

Если придерживаться варианта 1д, то получим наилучший оптимальный вариант 3, но реализуемый весной еще реже и больше ЭС ($p = 25\%$). Совсем затратный вариант предполагает повышенные навигационные попуски, т. е. замену варианта 1в на вариант 2в.

Необходимо отметить, что в расчетах намеренно не учитывается дополнительный приток в Урал вод из рек Чаган, Барбастау и Солянки, как и потери стока на бесприточном участке нижнего Урала вследствие испарения, задержания поймой и фильтрации, поскольку они, как и заборы воды, уже учтены через эмпирические гидробиологические зависимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обширных и достоверных гидрологических, биологических и водохозяйственных данных, принимая во внимание результаты предыдущих исследований, прежде всего связанных с разработкой Б.В. Фашевским, В.Г. Дубининой и их коллегами “Методики расчета экологического стока рек”, а также используемые в водохозяйственных расчетах подходы, впервые приблизительно оценен месячный и годовой сток р. Урал на границе России и Казахстана, который не ограничивал бы функционирование основных участников водохозяйственного комплекса (вблизи нижнего Урала), не ухудшал бы качество жизни населения и условия существования водных и околотоводных биоценозов, сохранял бы реку как гидрографический объект. Рассчитанный сток включил в себя распре-

ленные в течение года объемы уральской воды, необходимые городам Уральску и Атырау, сельским поселениям, оросительным и обводнительным каналам в пределах Западно-Каспийской и Атырауской областей (15–20% общего стока), речному транспорту (в основном <1% в сезон низких уровней – август–октябрь), для воспроизводства осетровых пород и сохранения биопродуктивности пойменных экосистем. Причем природоохранная составляющая рассчитанного стока впервые обоснована (для р. Урал) по результатам анализа построенных связей между биологическими и гидрологическими показателями. Она наибольшая (от 4.5 до 7.5 км³ без учета минимально допустимого стока) и “вступает в конфликт” с необходимостью аккумуляции весной основными уральскими водохранилищами больших объемов речной воды. Правда, эти объемы из р. Урал не изымаются, они необходимы лишь для затопления поймы и пойменно-русловых нерестилищ.

Рассчитаны четыре варианта подачи воды на казахстанский участок Урала. Первый вариант (минимальный) предполагает объем стока за год, равный 2.61 км³. Второй вариант (стандартный) требует 6.3 км³ воды в год и реализовывался за 1938–2020 гг. в 55–90% случаев, особенно хорошо – в лимитирующий период. Третий и четвертый варианты (оптимальные) – 7.8 и 9.3 км³. Во всех вариантах наибольшие расходы воды приходятся на май и апрель, что связано с необходимостью именно весной подавать воду в Кушумский и другие каналы, наполнять кушумские водохранилища, затапливать нерестилища и обводнять поймы, промывать русло.

Если не учитывать интересы водного транспорта, который так и не стал по разным причинам полноценным субъектом водохозяйственного комплекса, то исполнение этих требований облегчается из-за уменьшения требуемых объемов стока. Кроме того, важно понимать, что часть стока р. Урал, поступающего к границе РФ–Казахстан, в действительности формируется и регулируется водохранилищами на границе Республики Казахстан (бассейны рек Утвы, Илек, Ори и др.). Поэтому обеспечение рекомендуемого стока – совместная задача двух государств с обязательным учетом интересов

и возможностей уже сложившегося выше по течению водохозяйственного комплекса, его главных субъектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Отв. ред. *Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева*. М.: Наука, 2003. 367 с.
2. *Барышников Н.Б.* Морфология, гидрология и гидравлика пойм. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 280 с.
3. *Биримкулова Б.А.* Совершенствование конструктивных элементов и технологии затопления пойменных лиманов Центрального Казахстана. Автореф. дис.... канд. с.-х. наук. Алматы: КазНИИ вод. хоз-ва, 2009. 24 с.
4. Глобально значимые водно-болотные угодья Казахстана (дельта реки Урал и прилегающее побережье Каспийского моря). Астана, 2007. 264 с.
5. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. V. Вып. 2. Обнинск, Актыбинск, Алматы, 1984–1997.
6. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Вып. 4. Алматы, Астана, 2000–2022.
7. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. Л., СПб., М., 1981–1992.
8. *Демин А.П.* Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: ИВП РАН, 2011. 51 с.
9. *Дубинина В.Г.* Методические основы экологического нормирования безвозвратного изъятия речного стока и установления экологического стока (попуска). М.: Экономика и информатика, 2001. 118 с.
10. *Дубинина В.Г., Гаргона Ю.М., Чебанов М.С., Катунин Д.Н., Филь С.А.* Методические подходы к экологическому нормированию антропогенного сокращения речного стока // Вод. ресурсы. 1996. № 1. С. 78–85.
11. *Дубинина В.Г., Косолапов А.Е., Скачедуб Е.А., Коронкевич Н.И., Чебанов М.С.* Методические подходы к экологическому нормированию безвозвратного изъятия речного стока и установлению экологического стока (попуска) // Вод. хоз-во России. 2009. № 3. С. 26–61.
12. *Исбеков К.Б., Камелов А.К., Асылбекова С.Ж., Куликов Е.В., Кадимов Е.Л.* Современное состояние естественного воспроизводства осетровых рыб в реке Урал // Вестн. АГТУ. Сер.: Рыбное хоз-во. 2018. № 2. С. 81–88.
13. *Камелов А.К.* Современное состояние популяции русского осетра р.Урал и мероприятия по ее восстановлению. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Астрахань: АГТУ, 2004. 24 с.
14. *Кириллов А.В.* Лиманное орошение — средство повышения урожайности сеяных трав // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2008. № 3 (19). С. 42–45.
15. *Кокин П.П.* Гидрология среднего и нижнего течения реки Урала // Тр. Казахст. филиала АН СССР. Вып. 11. Т. 2. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1938. С. 87–152.
16. *Комиссаров А.В.* Оптимизация водного режима почв и минерального питания многолетних трав и пропашных культур в агроэкологических условиях Южного Урала. Автореф. ... докт. с.-х. наук. Уфа: Башкир. гос. аграр. ун-т, 2016. 42 с.
17. *Магрицкий Д.В.* Водохозяйственная деятельность в Российской части бассейна р.Урала: прошлое и настоящее // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. Пермь, 2023. Т. 1. С. 270–275.
18. *Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова Г.С.* Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2018. № 1. С. 90–101
19. *Магрицкий Д.В., Ефимова Л.Е., Гончаров А.В., Кенжебаева А.Ж.* Особенности современного водопользования в нижнем течении р. Урал, его проблемы и гидроэкологические последствия // Вопросы степеведения. 2022. № 1. С. 28–49.
20. *Магрицкий Д.В., Кенжебаева А.Ж.* Закономерности, характеристики и причины изменчивости годового и сезонного стока воды рек в бассейне р. Урал // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). 2017. № 3. С. 39–61.
21. *Магрицкий Д.В., Кенжебаева А.Ж.* Особенности и размеры влияния водохозяйственной деятельности на сток р. Урал в пределах Казахстана // Проблемы комплексной безопасности Каспийского макрорегиона. Материалы междунаро. науч.-практ. конф. Астрахань, 2021. С. 112–119.
22. *Мамин В.Ф., Савельева Л.Ф.* Лиманы — кладовые кормов. Волгоград, 1986. 144 с.
23. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. М., 2007. 56 с.

24. Научные основы нормирования экологического стока рек Казахстана / Под ред. *М.Ж. Бурлибаева*. Алматы: Каганат, 2014. 408 с.
25. *Нежжиховский Р.А.* Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 183 с.
26. Нерестилища осетровых рыб р. Жайык. Атлас. Алматы, 2017. 157 с. 200 ил.
27. *Онаев М.К.* Оценка периодичности затопления и восстановления продуктивности лиманов // *Агрономия и лесное хоз-во*. 2017. С. 91–93.
28. *Онаев М.К., Турганбаев Т.А., Сапарова Н.А.* Продуктивность естественного травостоя на инженерных лиманах при многолетней эксплуатации // *Мелиорация и водное хоз-во*. 2013. № 1. С. 5–7.
29. Паспортизация нерестилищ осетровых рыб на среднем плесе р. Урал: атлас. Оренбург: Оренб. сельхозхоз. ин-т, 1983. 146 с.
30. Проект “Реконструкция канализационных очистных сооружений в городе Атырау”. Т. 4. Охрана окружающей среды. Пояснительная записка. Караганда: ЭКОМ, 2018. 110 с.
31. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 511 с.
32. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. Алматы, Астана, 2010–2018.
33. *Сабиров М.С.* Лиманное орошение. Алма-Ата: Изд-во Кайнар, 1966. 172 с.
34. *Сурков В.В.* Динамика природных комплексов поймы верхней Оби в условиях сокращения ее затопления // *География и природ. ресурсы*. 1998. № 2. С. 102–109.
35. Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов реки Урал (Жайык) с притоками в 6 томах и 11 кн. Алматы: ПК “Институт Казгипрводхоз”, 2007.
36. *Тленбеков О.К.* Гидрология устьевой области Урала. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Балхаш: Каз. гос. ун-т, 1967. 23 с.
37. *Туктаров Б.И., Мосиенко Н.А. и др.* Интенсификация производства кормов на лиманах Саратовской области: Рекомендации. Саратов, 1997. 41 с.
38. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / Под ред. *В.Н. Михайлова*. М.: ГЕОС, 2013. 703 с.
39. *Фащевский Б.В.* Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока. Минск: БелНИИНТИ, 1989. 51 с.
40. *Чибилев А.А.* Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург, 2008. 312 с.
41. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V15Z0004049>
42. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600014252>
43. <https://businesspravo.ru/Docum/>
44. <https://ecoportal.kz/>
45. <https://eikos.kz/snip/>
46. <https://www.google.com/earth/>
47. <http://info.geology.gov.kz>
48. <https://nadezhda.kz/>
49. <https://online.zakon.kz/document/>
50. <https://primeminister.kz/ru/decisions/>
51. <https://unece.org/ru>
52. <https://www.gov.kz/>
53. <https://yandex.ru/maps/>

ASSESSMENT OF THE EXISTING AND FUTURE NEEDS FOR RIVER WATER IN THE KAZAKHSTAN SECTOR OF THE URAL RIVER

D. V. Magritsky*

Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

**e-mail: magdima@yandex.ru*

Based on stationary and expeditionary hydrological data and information about the water management complex and volumes of water use, we have calculated for the first time the minimum permissible, average, and optimal hydrographs (in monthly increments) of the influx of Ural waters from Russia to the West Kazakhstan and Atyrau regions, which would not limit the functioning of the main participants of the Kazakhstan water management complex, would not deteriorate the quality of life of the population and existence conditions for aquatic and near-water biocenoses, and would preserve the river as a hydrographic object. The resulting hydrographs summarize (1) the values of current and future water consumption in the cities of Uralsk and Atyrau and numerous rural settlements, as well as water intake by irrigation and water supply canals, including the Kushum Canal; (2) the needs of river navigation for controlling depths and continuous navigation from May to October; (3) the environmental flow necessary for the reproduction of sturgeon fish species and the preservation of the bioproductivity and biodiversity of floodplain ecosystems. The latter element required nonstandard solutions, including those based on the existing domestic approaches to determining critical and optimal values (with respect to floodplain—channel ecosystems) values. Another and completely new result of this research is analysis of the long-term dynamics of maximum and minimum levels in the lower reaches of the Ural River and the frequency, duration, and depth of floodplain flooding

Keywords: river, floodplain, canal, station, flow and water levels, water consumption, navigation, sturgeon, floodplain ecosystem.

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ БАССЕЙНА р. УРАЛ

© 2024 г. С. Д. Исаева, Э. Б. Дедова*

Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, Москва, 127434 Россия

*e-mail: dedova@vniigim.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 12.04.2024 г.

Принята к публикации 12.04.2024 г.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью повышения водообеспеченности агропромышленного комплекса и сельского населения с целью создания условий для устойчивого водопользования, охраны водных ресурсов и снижения эколого-экономических рисков на территории бассейна р. Урал с учетом тенденций изменения климата. Выполнен анализ особенностей природных и ирригационно-хозяйственных факторов формирования водных ресурсов на территории трансграничного бассейна р. Урал (Республика Башкортостан, Челябинская и Оренбургская области), показавший устойчивый рост температуры воздуха на протяжении последних 30–130 лет. Оценка текущего состояния водных объектов, режимов работы гидротехнических сооружений, экологического состояния мелиорированных земель на площади 140 тыс. га позволила выявить ухудшение технического состояния мелиоративных систем за счет физического износа. Выполнен анализ водного баланса водосборной территории трансграничного бассейна р. Урал в естественных условиях и при орошении, а также особенности сельскохозяйственного водоснабжения. Рассмотрены виды экологической опасности, перерастающей в экономический риск при водопользовании, в том числе возможность возникновения дефицита водных ресурсов, развития процессов подъема уровня грунтовых вод, подтопления земель, вторичного засоления, осолонцевания, диффузного загрязнения водных объектов. Приведены зависимости для расчета рисков одномоментных, а именно затопления водами катастрофических паводков, и перманентных, таких как вторичное засоление, осолонцевание, подтопление и др. Предложена зависимость для интегральной оценки пространственно-временного развития эколого-экономических рисков. Проведенные исследования по выявлению экологически опасных процессов, связанных с использованием водных ресурсов в пределах российской части бассейна р. Урал, позволили сформулировать предложения по снижению рисков и повышению устойчивости функционирования мелиоративно-водохозяйственных систем.

Ключевые слова: мелиоративно-водохозяйственный комплекс, гидромелиоративные системы, экосистемное водопользование, сельское хозяйство, мелиорация, экологический риск.

DOI: 10.31857/S0321059624050039 **EDN:** VXZBPN

ВВЕДЕНИЕ

Трансграничный бассейн р. Урал подвержен интенсивной техногенной нагрузке. Здесь расположены крупнейшие промышленные центры России и Казахстана и проживает порядка 4.5 млн человек. Развита горнодобывающая, металлургическая, нефтегазовая и обрабатывающая промышленность, интенсивно ведется и развивается сельскохозяйственное производство и орошаемое земледелие, включая лиманное орошение. Река Урал и ее крупнейшие притоки имеют важное рыбохозяйственное значение [1, 9, 20, 32]. Пространственные и сезонные изменения климата, а также

высокая антропогенная нагрузка приводят к развитию процессов деградации не только земельных, но и водных ресурсов. В результате ограничивается возможность использования водных ресурсов, снижается биоразнообразие водных объектов, затруднено развитие рыбного хозяйства, орошения и обводнения земель. Настоящая работа посвящена анализу и оценке природных и ирригационно-хозяйственных условий водосборной территории российской части р. Урал в условиях климатических изменений, преодоления дефицита водных ресурсов в регионах, где увеличивается аридность климата. Поддержание благоприятной экологической обстановки в речном

бассейне р. Урал, эффективное использование, защита и сохранение водных ресурсов возможны за счет модернизации мелиоративно-водохозяйственного комплекса, совершенствования организационных и правовых принципов интегрированного управления водными ресурсами при орошении, развития информационно-аналитического обеспечения принимаемых при управлении решений.

МЕТОДОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методология исследований базируется на системном подходе и геоинформационных методах исследований, на теоретических и практических разработках в области экосистемного водопользования, развития водохозяйственного комплекса АПК, ведения сельского хозяйства в разных природно-хозяйственных условиях страны, на анализе нормативно-правовых документов и организационных принципов управления водопользованием и мелиорацией земель [2, 3, 6, 7, 13, 16, 23–26, 38–40].

Для анализа климатических изменений проанализированы результаты прогнозов, выполненных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), а также по глобальным сценарным исследованиям по “Моделям общей циркуляции атмосферы и океана” (МОЦАО), отображающим особенности поведения климата [15, 22, 40]. Выполнены статистические расчеты по данным гидрометеорологических наблюдений, характеризующих динамику поступления атмосферных осадков и изменения температуры воздуха [10]. Для расчета потребности в водных ресурсах использовали данные Федеральной службы государственной статистики [34].

Для анализа технического состояния гидро-мелиоративных систем использованы первичные данные из официальных информационных ресурсов Минприроды России и Минсельхоза России, а именно: по Инвентаризации мелиорированных земель и мелиоративных систем различной собственности 2010–2011 гг., Государственного водного реестра, по паспортизации государственных мелиоративных систем и отнесенных к государственной собственности, Ста-

тистической отчетности по форме 2ТПводхоз, а также Информационных ресурсов ВНИИ “Радуга”, где представлены материалы территориальных Управлений мелиорации Департамента мелиорации Минсельхоза России. Все исходные данные стали основой, сформированной в процессе исследований базы данных мелиоративных объектов федеральной собственности.

Экологический риск, связанный с водопользованием, — это возможность (вероятность) определенных потерь или ущербов при опасности развития экологически неблагоприятных процессов в природной среде под влиянием водохозяйственной деятельности. Потенциальные экологически опасные процессы, связанные с водными объектами в бассейне р. Урал, следующие: возможность дефицита водных ресурсов, питьевой и оросительной воды нормативного качества; загрязнение, в том числе диффузное, водных объектов, в том числе р. Урал; затопление территории при паводках; подтопление земель, развитие вторичного засоления при орошении; развитие эрозионных процессов при сельскохозяйственном и водохозяйственном воздействии. Для обработки результатов использованы методы математической статистики, для анализа региональных материалов по формированию и использованию водных ресурсов — средства дистанционного зондирования, находящиеся в открытом доступе. Обработка и анализ данных космических изображений проводилась посредством свободной кроссплатформенной геоинформационной системы QGIS.

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В БАССЕЙНЕ р. УРАЛ

Главные климатические факторы, определяющие величину годового стока рек, — снеговые запасы в бассейнах к началу снеготаяния, дождевые осадки в период половодья, степень увлажнения и глубина промерзания почвогрунтов водосборов, интенсивность снеготаяния весной. Изменение климата воздействует на водные ресурсы посредством ряда механизмов, прежде всего из-за изменений условий их формирования, внутригодового перераспределения выпадающих осадков и процессов их инфильтрации в подземные воды, сокращения восполнения

запасов подземных вод, усиления испарения в ряде регионов или заболачивания земель и др. [5, 8, 9, 15, 28].

Анализ многолетней изменчивости сезонных и годовых значений приземной температуры воздуха, а также сумм атмосферных осадков по сетевым метеостанциям, расположенным в бассейне р. Урал, показал рост характеристик потепления к средним и южным частям бассейна. Для летнего сезона оно стало статистически значимым — происходит рост средней летней температуры воздуха. С середины 1990-х гг. как доказательство развития процессов потепления в бассейне Урала происходит существенное увеличение суммы положительных значений температуры воздуха за холодный период (с 1 ноября по 31 марта). Отмечены высокие положительные аномалии температуры зимой, частота оттепели (рис. 1). По данным метеостанции в г. Оренбурге, отклонение суммы положительных значений температуры в 1995–2015 гг. от таковой базового периода составило $+27^{\circ}\text{C}$; в г. Верхнеуральске — $+13.4^{\circ}\text{C}$. Потепление в зимний период существенно влияет на условия формирования речного и подземного стока (усиление питания подземных вод в зимний период, дополнительное снижение питания рек подземными водами в межень). В то же время разнонаправленные тенденции в многолетнем ходе сумм сезонных осадков определили в последние 20 лет некоторое снижение годовых величин осадков.

Результаты сценарных долгосрочных прогнозных исследований МГЭИК [15, 22] показы-

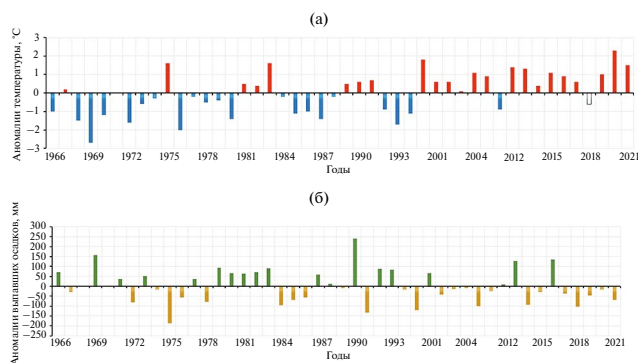


Рис. 1. Динамика аномальных значений среднегодовых значений температуры воздуха (а) и среднегодовых осадков (б) от нормы за период 1966–2021 гг., п. Акъяр, Республика Башкортостан.

вают, что в перспективе ожидаются изменения климатических факторов. В Оренбургской и Челябинской областях прогнозируется увеличение потока солнечной энергии соответственно на $3\text{--}5\text{ Вт/м}^2$ и $2\text{--}3\text{ Вт/м}^2$. Географическое распределение прогнозируемых изменений осадков в зимний и летний периоды различны. Так, на территории Оренбургской области прогнозируется значительное уменьшение осадков в летний период, в то время как осадки в зимний период останутся неизменными или вырастут незначительно. На территории Челябинской области будет наблюдаться противоположная ситуация — ошутимое увеличение осадков в зимний период и незначительный рост количества осадков в летний. Анализ прогнозируемых изменений тепло- и влагообеспеченности свидетельствует о преобладающих тенденциях сокращения увлажненности (аридизации) территории — значительное увеличение температуры при небольшом росте объемов выпадающих осадков, которых может не хватать для оптимальной влагообеспеченности.

Результаты теоретического анализа подтверждаются выполненной оценкой фактической климатической ситуации на трансграничной территории бассейна р. Урал. Построены графики динамики осадков и температуры воздуха за периоды от 30 до 130 лет. Отмечается рост аномальных отклонений от норм температуры и атмосферных осадков по Республике Башкортостан, Оренбургской и Челябинской областям. Среднегодовые значения температуры по регионам растут в разной степени, что подтверждается аппроксимацией фактических данных методом скользящего среднего при осреднении за периоды в 3, 5, 10, 20 и 30 лет. Наиболее ярко выражены трехлетние циклы колебаний температуры воздуха (рис. 2). Линейные тренды с высокими коэффициентами детерминации (>0.7) хорошо прослеживаются при 20–30-летнем осреднении данных методом скользящего среднего. В то же время осадки — ярко выраженная нестабильная величина. Аппроксимация сумм осадков позволяет описать их динамику (тренды) полиномами 3–5-й степени. Рост температуры и учащение засух определяют необходимость надежного обеспечения орошения в рассмотренных регионах.

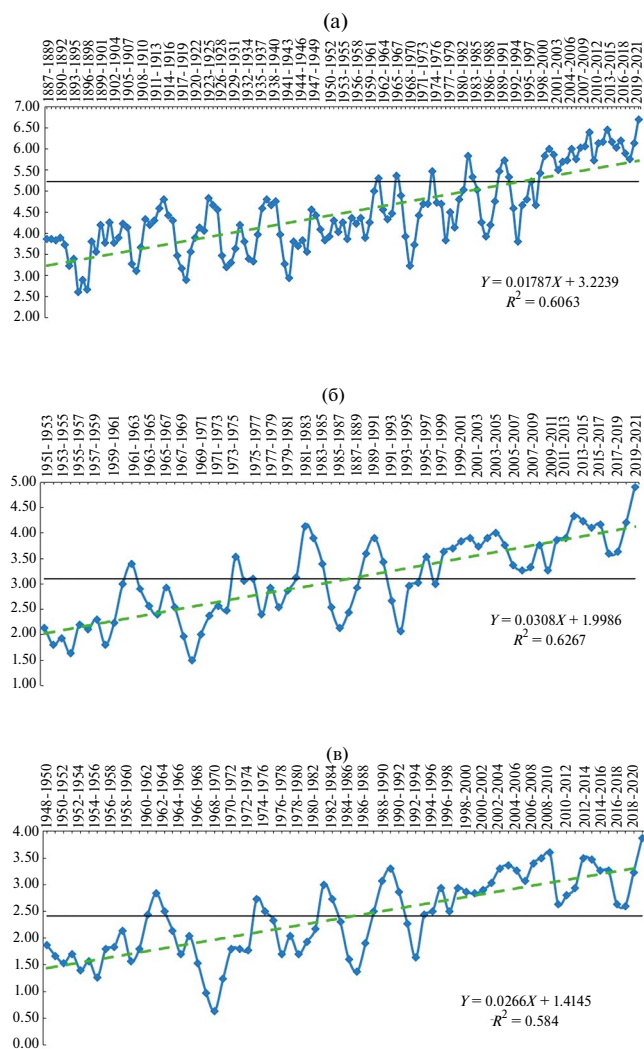


Рис. 2. Анализ трехлетних скользящих среднего-довых значений температуры воздуха за периоды 1887–2021 гг. г. Оренбург (а), 1951–2021 гг. п. Актыб (б), 1948–2020 гг. г. Магнитогорск (в).

Анализ исследований водохозяйственных балансов [12, 30, 33] показал, что общий забор воды из природных водных объектов в бассейне р. Урал в 2020 г. оценивался в 1090 млн·м³. Величина суммарного изъятия речного стока из водных объектов (с учетом величины потерь на дополнительное испарение из прудов и водохранилищ) составляет ~1380 млн м³. При этом допустимая величина безвозвратного изъятия стока в бассейне на территории РФ составляет 1225.38 млн м³ (или 4.9% среднемноголетнего стока в принятом при водохозяйственном районировании створе на границе РФ и Республики Казахстан). Кроме того, величина фактического

безвозвратного изъятия стока значительно меньше величины допустимого безвозвратного изъятия стока для характерных лет 25; 50- и 75%-й обеспеченностей по стоку. Такая же картина наблюдается для данных за 2020 г. (безвозвратно изымается только 50.6% от допустимой величины). Незначительное превышение отмечено для маловодного года 95%-й обеспеченности, однако в маловодные годы потребности водопользователей подлежат корректировке в сторону уменьшения.

Достаточная водообеспеченность подтверждается прогнозными расчетами потребности в воде для сельскохозяйственного питьевого водоснабжения, животноводства и орошения земель. При расчетах потребностей в воде для животноводства учитывалось поголовье крупного (потребность в воде 60–65 л/сут) и мелкого рогатого (козы, овцы 3–10 л/сут) скота, а также лошадей (45–60 л/сут). Полученные данные по рассмотренным регионам (табл. 1) показывают, что в Республике Башкортостан потребности питьевого водоснабжения населения составляют 18.1 млн м³/год, для поения скота необходимо 5.4 млн м³/год, суммарная потребность в водных ресурсах – 23.5 млн м³/год. Для Оренбургской области те же показатели составляют соответственно 54.1 млн, 9.2 млн и 63.3 млн м³/год. Для Челябинской области для питьевого водоснабжения населения необходимо 37.8 млн, для поения скота – 2.2 млн, суммарная потребность в водных ресурсах – 40 млн м³/год. Таким образом, максимальная потребность в водных ресурсах для обеспечения питьевого водоснабжения населения существует в Оренбургской области с большим населением, затем в Челябинской области и Республике Башкортостан. Та же последовательность сохраняется в обеспечении питьевой водой животноводства в субъектах федерации. В целом для развития отрасли животноводства потребность в водных ресурсах для поения скота по регионам достаточная.

В то же время регионы трансграничного бассейна р. Урал испытывают недостаток водных ресурсов для орошения сельскохозяйственных культур. Площадь сельскохозяйственных орошаемых земель составляет ~140 тыс. га. Дефицит по регионам варьирует от 12 (Республика Баш-

Таблица 1. Потребности в водных ресурсах для обеспечения питьевого водоснабжения населения, а также животноводства по Республике Башкортостан, Оренбургской и Челябинской областей, в пределах трансграничного речного бассейна р. Урал, тыс. м³/год

Название района	Население, чел.	Потребность*, тыс. м³/год	Поголовье с.-х. животных, головы			Потребность в водопое с.-х. животных тыс. м³/год				Всего потребность водных ресурсов, тыс. м³/год
			КРС	МРС	лошади	КРС**	МРС***	лошади****	всего	
Республика Башкирия										
Абзелиловский	43890	2787.45	23280	22554	7662	552.32	82.32	167.80	802.44	3589.89
Баймакский	54829	3482.19	27218	28574	14364	645.75	104.30	314.57	1064.61	4546.80
Зианчуринский	24272	1541.51	25238	47096	3792	598.77	171.90	83.04	853.72	2395.23
Зилаирский	14293	907.75	9501	11988	2520	225.41	43.76	55.19	324.36	1232.10
Кутарчинский	27247	1730.46	16875	14776	2458	400.36	53.93	53.83	508.12	2238.58
Куяргазинский	21741	1380.77	23483	9523	1570	557.13	34.76	34.38	626.28	2007.05
Учалинский	69520	4415.22	20614	11184	5783	489.07	40.82	126.65	656.54	5071.75
Хайбуллинский	29679	1884.91	17036	21003	3439	404.18	76.66	75.31	556.15	2441.07
Итого	285471	18130.26	163245	166698	41588	3872.99	608.45	910.78	5392.21	23522.48
Челябинская область										
Агаповский	32369	2055.76	15158	8963	1791	359.62	32.71	39.22	431.56	2487.32
Брединский	24339	1545.77	11805	8649	1251	280.07	31.57	27.40	339.04	1884.81
Верхнеуральский	32946	2092.40	13300	7281	3643	315.54	26.58	79.78	421.90	2514.30
Карталинский	44870	2849.69	12237	8694	1121	290.32	31.73	24.55	346.61	3196.30
Кизильский	20912	1328.12	12761	13860	2614	302.75	50.59	57.25	410.59	1738.71
Магнитгорский	413251	26245.57	390	567	30	9.25	2.07	0.66	11.98	26257.55
Нагайский	17690	1123.49	7854	7111	1613	186.34	25.96	35.32	247.62	1371.11
Итого	586377	37240.80	73505	55125	12063	1743.91	201.21	264.18	2209.29	39450.10
Оренбургская область										
Адамовский	20331	1291.22	20575	10516	2043	488.14	38.38	44.74	571.27	1862.49
Акбулакский	23509	1493.06	28427	26011	1451	674.43	94.94	31.78	801.15	2294.20
Беляевский	14245	904.70	19488	12836	875	462.35	46.85	19.16	528.37	1433.07
Гайский	41341	2625.57	6574	5928	724	155.97	21.64	15.86	193.46	2819.03
Домбаровский	12972	823.85	11731	12689	335	278.32	46.31	7.34	331.97	1155.82
Илекский	22580	1434.06	19921	10970	1678	472.63	40.04	36.75	549.41	1983.47
Кваркенский	13737	872.44	13105	9849	1180	310.92	35.95	25.84	372.71	1245.14
Кувандыкский	38032	2415.41	24673	9744	658	585.37	35.57	14.41	635.34	3050.76
Медногорск	25088	1593.34	1038	900	94	24.63	3.29	2.06	29.97	1623.31
Новорский	25380	1611.88	10095	4341	1140	239.50	15.84	24.97	280.31	1892.20
Новотроицк	87591	5562.90	2747	2019	897	65.17	7.37	19.64	92.19	5655.09

Таблица 1. Окончание

Название района	Население, чел.	Потребность*, тыс. м³/год	Поголовье с.-х. животных, головы			Потребность в водопое с.-х. животных тыс. м³/год				Всего потребность водных ресурсов, тыс. м³/год
Октябрьский	17564	1115.49	18243	7891	1006	432.82	28.80	22.03	483.65	1599.14
Оренбургский	106666	6774.36	20509	9755	1251	486.58	35.61	27.40	549.58	7323.94
Орск	227131	14425.09	3240	2918	557	76.87	10.65	12.20	99.72	14524.81
Первомайский	22286	1415.38	16159	13086	1381	383.37	47.76	30.24	461.38	1876.76
Сакмарский	27745	1762.08	12741	3402	255	302.28	12.42	5.58	320.28	2082.37
Саракташский	36694	2330.44	38836	7038	963	921.38	25.69	21.09	968.16	3298.60
Соль-Илецкий	48915	3106.59	28870	40951	2039	684.94	149.47	44.65	879.07	3985.66
Ташлинский	22762	1445.61	24459	6906	1292	580.29	25.21	28.29	633.79	2079.41
Ясненский	17880	1135.56	12751	13308	594	302.52	48.57	13.01	364.10	1499.66
Итого	852449	54139.04	334182	211058	20413	7928.47	770.36	447.04	9145.87	63284.91

* 174 л/чел. сут.
** КРС (крупный рогатый скот) – 60–65л/сут.
*** МРС (овцы, козы) – 3–10 л/сут.
**** лошади – 45–60 л/сут.

кортостан) до 116.8 и 120.5 млн м³ (Оренбургская и Челябинская области), и при суммарной потребности в воде для орошения порядка 325.7 млн м³/год ее дефицит в целом составляет 249.2 млн м³/год воды.

МЕЛИОРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ
И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ
ПРИ ОРОШЕНИИ

Экологически неблагоприятные процессы на мелиорированных (орошаемых) землях могут быть связаны с негативным воздействием вод при водоподаче и водопользовании. Большие непроизводительные потери воды на фильтрацию, нерациональное ее использование, потери воды на орошаемых землях приводят к подъему уровня грунтовых вод, развитию подтопления и заболачивания, а также ко вторичному засолению земель [8, 16, 25, 26]. Как правило, это происходит из-за низкого технического уровня гидромелиоративных систем, отсутствия современной поливной техники, водосберегающих технологий орошения, искусственного дренажа в условиях низкой естественной дренированности и пр.

Анализ технического состояния государственных мелиоративных систем в пределах Челябинской, Оренбургской областей и Республики Башкортостан, расположенных в пределах бассейна р. Урал, показал высокий физический износ гидротехнических сооружений, в результате которого системы нуждаются в ремонте или реконструкции, а также в техническом перевооружении для предотвращения непроизводительных потерь воды.

Потенциально опасные с этой точки зрения – земли с УГВ от 1.5 до 2 м при отсутствии дренажной системы [16]. Яркий пример – система “Лиманного орошения” с неудовлетворительным мелиоративным состоянием земель из-за близкого залегания грунтовых вод на площади 2.2 тыс. га в Хайбуллинском районе Республики Башкортостан. В пределах системы происходит развитие вторичного засоления на площади 0.7 тыс. га. На всех мелиоративных системах Челябинской области, например, отсутствует дренаж. Необходимость строительства дренажа

изначально определяется низкой естественной дренированностью территории и подтверждается расчетами при проведении проектных работ.

В то же время отказ по разным причинам от орошения, существующий в пределах гидромелиоративных систем российской части бассейна р. Урал, увеличивает экологическую климатическую опасность засухи и экономический риск возникновения ущербов (физических и финансовых), связанных с недополучением урожая. В настоящее время (2014–2022 гг.) на значительной части мелиорированных земель в рассматриваемых регионах поливы в вегетацию по разным причинам не проводятся [19, 21]. При этом основная часть рассмотренных мелиоративных систем расположена в пределах территории, наиболее подверженной засухам, например – Абзелиловская и Хайбуллинская системы в Республике Башкортостан [4, 21]. Такая ситуация в условиях усиления засушливости климата повышает экономические риски, связанные с возможной потерей урожая из-за засух. Так, в 2010 г. в Оренбургской области весенне-летняя засуха привела к гибели сельхозкультур на площади >1800 га; в Челябинской области урожай был в 4 раза ниже, чем в 2009 г., урожайность зерновых культур в среднем составила 6.5 ц/га; в Башкортостане валовый сбор культур сократился в 3.6 раза по сравнению с предыдущим годом, а урожайность составила 9.9 ц/га против 25–27 ц/га в 2009 г. [35]. Кроме этого, наблюдающаяся в последние годы аномально высокая температура воздуха и засухи провоцируют возникновение природных пожаров. Так, на территории трансграничного бассейна р. Урал по космическим снимкам Sentinel-2 (07.08.2021) зафиксированы природные пожары в Айтекебийском и Хромтауском районах Актыобинской области Казахстана, в Кувандыкском районе Оренбургской области и Хайбуллинском районе Республики Башкортостан РФ. Площадь природных пожаров в 2021 г. на этих территориях составила 1477.5 км². В 2022 г. отмечены природные пожары на территории Кувандыкского и Адамовского районов Оренбургской области на площади 69.2 км². Такая ситуация требует развития орошения в бассейне Урала.

Отсутствие поливов связано с неисправностью внутрихозяйственной оросительной сети,

с отказом сельхозтоваропроизводителей от проведения поливов из-за высокой стоимости электроэнергии и водоподачи, с отсутствием материально-технических средств в сельскохозяйственных предприятиях. Так, в Оренбургской области в целом только из-за неисправности оросительной сети не поливалось в 2021 г. 3.4 тыс. га [14, 19, 29].

В Республике Башкортостан значительным физическим износом (от 80 до 100%) характеризуются гидротехнические сооружения в пределах Абзелиловской межхозяйственной мелиоративной системы – магистральный трубопровод, насосные станции 1–6 (водозаборы); на Хайбуллинской оросительной системе – насосная станция 1 (водозабор); на Маканской МС – водозабор НС 1 и магистральный трубопровод (водоотведение). В Оренбургской области на Черновской МС изношены водовыпуски и регуляторы различных конструкций; на Городищенской системе, как и на Илекской системе, водовыпуски на магистральных каналах МК 1 и МК 2 характеризуются 100%-м износом. На Городищенской системе, кроме того, 100% износ характерен для регуляторов различных конструкций; износ 80% – у насосных станций НС 2, НС 3, НС 4. Характерны пестрые значения КПД оросительных систем, составляющие, например, на системе “Лиманное орошение” всего 0.2, на Маканской МС – 0.3. Для всех проанализированных гидромелиоративных систем характерен высокий физический износ, часто – условно работоспособное состояние, низкая обеспеченность техникой [14].

В Республике Башкортостан неисправность оросительной сети и ее элементов рассматривается как основная техническая причина отсутствия поливов на орошаемых землях Абзелиловской, Хайбуллинской и Маканской оросительных систем. Заливается только 2.4 тыс. га на системе “Лиманное орошение” [4, 21, 29].

При рассмотрении гидромелиоративных систем Башкортостана в качестве экологически опасных процессов выявлены подтопление, вторичное засоление почв, осолонцевание. Расчеты экологического риска относительно приемлемой величины показали, что в случае подтопления земель уровень риска – в катего-

рии допустимого, на территории Учалинской ОС — экологически предельно допустимого, на Хайбуллинской МС — экологически недопустимого, когда необходимо проведение мелиоративных мероприятий. Риск засоления земель на Зиянчуринский МС определен как приемлемый, а на Хайбуллинской МС — как экологически недопустимый.

Выявлена экологическая опасность, связанная с использованием для орошения вод ненормативного качества р. Таналык в Хайбуллинском районе, Бузавлыкского водохранилища в Зилаирском районе, оз. Колтубан и из пруда на р. Тазаулык в Баймакском районе. Химический состав вод, относящихся к IV классу опасности, при использовании может привести к снижению плодородия почвы, развитию процессов содового засоления [4, 21].

В процессе геоинформационного анализа экологической ситуации были рассмотрены данные ДЗЗ. Результаты анализа по Магнитогорскому (Челябинская область), Черновскому (Оренбургская область), Гусевскому, Дергамышскому водохранилищам и оз. Чебаркуль (Республика Башкортостан) позволили определить многолетнюю и внутригодовую динамику водных объектов, воздействие на них орошения, возможность возникновения диффузного загрязнения и пр.

В Оренбургской области на Черновском водохранилище (назначение — рыбное хозяйство и орошение) выявлены изменения объемов водных ресурсов и площади зеркала — параметры сокращаются от мая к сентябрю, а именно: в 2010 г. с 8.46 до 6.7 км², или на 22%; в 2015 г. — с 7.47 до 6.9 км², или на 10%; в засушливый 2020 г., когда осадки были менее среднегодовой величины по области и составляли всего 250 мм, водная поверхность сократилась с 8.24 до 3.5 км², или на 58%, в связи с интенсивным использованием воды на орошение. Установлена экологическая опасность, связанная с подтоплением земель, затоплением в период паводков для территории, прилегающей к Черновскому водохранилищу, что требует разработки защитных противопаводковых мероприятий для ниже расположенных населенных пунктов, в частности с. Краснохолм.

Для Гусевского водохранилища, обслуживающего Абзелиловскую межхозяйственную оросительную систему, анализ данных показал, что на его уровенный режим сильно влияют климатические факторы и забор воды на орошение, что может стать причиной ухудшения состояния водной экосистемы. Площадь зеркала с мая по сентябрь 2010 г. сократилась в 2 раза: с 0.37 до 0.17 км². В 2015 г. площадь сократилась значительно меньше — с 0.3 до 0.24 км²; в 2020 г. сохранялась практически постоянной — 0.32–0.31 км². Рассмотрен экологический риск, связанный с недопустимой глубиной залегания и минерализацией грунтовых вод, развитием засоления почв, диффузного загрязнения водных объектов, рецессии водных экосистем при загрязнении.

Сельскохозяйственные угодья удалены от границ водоохранной зоны оз. Чебаркуль, опасность прямого диффузного загрязнения практически отсутствует. Для повышения экологической безопасности водного объекта требуется соблюдение специального режима хозяйственной деятельности в водоохранной зоне, мониторинг их состояния. В результате обследования Ириклинского водохранилища не выявлено нарушений ведения хозяйственной деятельности в водоохранной зоне водохранилища. По сравнению с 2021 г. наблюдается низкий уровень воды, формируется процесс зарастания [1]. Функционирование Ириклинского водохранилища в настоящее время экологической опасности не представляет.

Проведенный анализ [1, 4, 6, 11, 23–27, 31] позволил выделить следующие факторы и виды экологической опасности, связанные с состоянием гидромелиоративных систем, мелиоративного фонда, элементов водного баланса бассейна р. Урал, которые могут перейти в эколого-экономические риски в пределах орошаемых земель региона:

большие потери на фильтрацию в пределах действующих оросительных систем из-за значительного износа и низкого КПД мелиоративных систем, снижающих эффективность использования водных ресурсов, способствующих развитию подтопления и засоления земель;

физический износ водозаборных насосных станций, достигающий 100%, что создает опасность возникновения дефицита водоподачи для поливов культур в случае возврата земель в оборот за счет развития орошаемого земледелия;

близкое к поверхности залегание грунтовых вод при интенсивном испарении на прилегающей к лиманам территории, что вызывает подтопление и развитие вторичного засоления;

физический износ дамбы Дергамышского водохранилища, что может способствовать затоплению, рассредоточение водных ресурсов в результате возможного прорыва;

износ и плохое техническое состояние магистральных трубопроводов, каналов на оросительных системах, что либо не позволяет проводить поливы сельскохозяйственных культур, либо вызывает высокие непроизводительные потери воды;

загрязнение сбросными водами водоприемников и водисточников;

высокая зарегулированность стока р. Таналык, что привело к сокращению на треть речного стока в нижнем течении реки;

отказ от орошения как путь к потерям урожая в засушливые периоды, к развитию пожароопасных ситуаций и др.

Все вышеперечисленные факторы опасности формируют экологические и экономические риски в текущих условиях и при развитии орошения, поэтому необходимо проведение комплексного экологического мониторинга мелиоративных систем, мелиорированных земель, водных объектов, а на его основе — обоснование ремонта, реконструкции и технического перевооружения мелиоративных систем. При этом для снижения экологической опасности и рисков целесообразно начинать с технико-технологического аудита мелиоративных систем с оценкой их экономической значимости и возможности привлечения трудовых и финансовых ресурсов как основы для планирования работ по ремонту и реконструкции.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕЛИОРАТИВНО-ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ

На основе проведенного анализа технического состояния мелиоративных систем государственной собственности определены меры по снижению эколого-экономических рисков и повышению устойчивости функционирования мелиоративно-водохозяйственных систем государственной собственности на территории Республики Башкортостан, Челябинской и Оренбургской областей.

Республика Башкортостан

Абзелиловская оросительная система — необходимы рекогносцировочные обследования водисточников — Гусевского водохранилища и оз. Чебаркуль, оценка состояния гидротехнических конструкций, выявление опасности развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов (размыв в бортах водохранилища, загрязнение), экспертная оценка заиленности водохранилища и полезной емкости; регулярный контроль технического состояния магистрального трубопровода; оценка работоспособности и необходимости ремонта конструктивных элементов, энергосилового оборудования или его замены на водозаборах НС-1, НС-2, НС-4, НС-5, НС-6.

Хайбулинская оросительная система — оценка технического состояния и обоснование объемов ремонта Дергамышского водохранилища, мониторинг качества воды; регулярный мониторинг магистрального трубопровода с оценкой технического состояния, выявление эксплуатационно-опасных участков.

Маканская оросительная система — оценка работоспособности, необходимости ремонта конструктивных элементов, энергосилового оборудования водозабора НС-1; регулярный мониторинг магистральных трубопроводов для водоподачи и водоотведения с оценкой технического состояния, выявление эксплуатационно-опасных участков.

Система лиманного орошения — оценка технического состояния, обоснование ремонта или реконструкции оградительной дамбы.

Оренбургская область

Черновская оросительная система — эксплуатационное обследование, оценка состояния гидротехнических сооружений Черновского водохранилища, назначение восстановительных и эксплуатационных мероприятий, мониторинг качества воды; ремонт земляной плотины, эксплуатационное обследование магистрального канала МК 1, выявление разрушения откосов, зарастания и др., оценка текущей пропускной способности канала и сравнение с проектной, ликвидация установленных дефектов и неблагоприятных для эксплуатации явлений; контроль водовыпусков, оценка технического состояния, технических нарушений эксплуатации, определение необходимости ремонта, замены сооружений.

Городищенская оросительная система — контроль водовыпусков, оценка технического состояния, технических нарушений эксплуатации, определение необходимости ремонта, замены; оценка технического состояния конструктивных элементов регуляторов с учетом особенностей разных конструкций, выявление трещин и других нарушений, влияющих на текущую и потенциальную безопасность сооружения, определение работоспособности регулятора и необходимых ремонтных работ; оценка работоспособности насосных станций, необходимости ремонта конструктивных элементов, энергосилового оборудования или его замены.

Илекская оросительная система — мониторинг состояния распределительных каналов, определение участков разрушения берегов, зарастания, заиления и пр.; разработка предложений по восстановлению пропускной способности, сокращению непроизводительных потерь воды; контроль технического состояния водовыпусков, ремонт и замена конструктивных элементов; оценка работоспособности Илекской насосной станции, необходимости ремонта конструктивных элементов, энергосилового оборудования.

Челябинская область

Межхозяйственная оросительная система “Искра” — реконструкция внутрихозяйственной

оросительной сети; регулярный мониторинг магистрального трубопровода с оценкой технического состояния, выявление эксплуатационно-опасных участков.

Проведение предлагаемых мероприятий в уточненных объемах обеспечит снижение экологических рисков, связанных с непроизводительными потерями оросительной воды, и экономических рисков как следствие снижения продуктивности земель. Отсутствие поливов, связанное с отказом сельхозпроизводителей от их проведения в связи с высокой стоимостью электроэнергии и водоподачи, как экологически опасное явление требует пересмотра системы субсидирования поливов государством, совершенствования системы платежей за водопользование и иных мер, связанных с обоснованием дополнительного финансирования сельхозпроизводителей.

Мелиоративное состояние орошаемых сельскохозяйственных угодий в зоне деятельности оросительных систем федерального значения Оренбургской области (Илекской, Городищенской и Черновской) по уровню залегания грунтовых вод и по степени засоления — хорошее. Выполненный анализ показал, что на преобладающей части территории эколого-экономические риски, связанные с подтоплением, засолением, осолонцеванием почв, развиты локально. Однако ведение эффективного орошаемого земледелия должно основываться на комплексном управлении водными ресурсами, мелиорированными землями и гидротехническими сооружениями мелиоративных систем. Такое комплексное или интегрированное управление предполагает постоянное ведение экологического мониторинга водных объектов, мелиоративного фонда, технического состояния ГТС [36, 37, 39].

Состояние мелиоративной системы во многом определяет экологическое состояние мелиорированных земель и развитие экологически опасных процессов. В процессе мониторинга для обоснования текущих или оперативных эксплуатационных мероприятий по поддержанию рабочего состояния ГТС мелиоративных систем визуальные и инструментальные обследования для оценки технического состояния мелиора-

тивных систем проводятся три раза в год: весной (в период заполнения системы водой), летом (в период наиболее интенсивной эксплуатации), осенью (после удаления воды из системы) [11, 23, 26, 27, 36]. Возможны внеочередные обследования, связанные с непредвиденными ситуациями и авариями. Опасные явления и процессы, используемые для диагностики технического состояния мелиоративной системы, прежде всего оросительных каналов, следующие: потери воды в канале; наличие фильтрации при грунтовых, бетонных, пленочных и других типах облицовки каналов в пределах элемента гидротехнических сооружений; вертикальное (осадка, просадки) и горизонтальное перемещение сооружений мелиоративных систем; наружные дефекты (истирания, раковины, отслоение, трещины; фильтрация по трещинам; деформации межблочных и секционных швов на сооружениях мелиоративных систем; суффозионные процессы; надежность антикоррозийного покрытия металлоконструкций сооружений мелиоративных систем.

При полной технической диагностике для определения мер по управлению экологическим риском выполняются визуальные, инструментальные наблюдения и отбор проб материала гидротехнических сооружений (бетона, грунта) с последующей обработкой проб с помощью мобильной аналитической лаборатории или стационарной.

Контролю подлежит соблюдение правил пользования отдельными элементами мелиоративной системы. При обследовании должен быть проанализирован опыт работы сооружения за период эксплуатации, отказы оборудования. В результате обследования должно быть оценено состояние и эксплуатационная пригодность мелиоративной системы и ее отдельных элементов, выявлены объекты, подлежащие текущему или капитальному ремонту.

Экологически опасные процессы, требующие не только контроля, но и проведения водоочистки и водоподготовки, развиваются при использовании для орошения подземных вод ненормативного качества из р. Таналык в Хайбуллинском районе, Бузавлыкского водохранилища в Зилаирском районе, оз. Колтубан, пруда на р. Тазаулык в Баймакском районе, где воды по химическому

составу относятся к IV классу опасности из-за щелочной реакции. В этом случае необходимы мероприятия по мелиорации оросительной воды и почв, так как при ее использовании может произойти снижение плодородия почвы, развитие процессов содового засоления. Необходим контроль воды, забираемой на орошение МОС “Искра” из Магнитогорского водохранилища.

Для обеспечения экологически благоприятного состояния водных объектов и снижения рисков диффузного загрязнения водных объектов от сельскохозяйственных земель при орошении, помимо усиления контроля за соблюдением режима водоохраных зон, могут быть обоснованы следующие мероприятия:

при ведении и развитии орошения совершенствование обоснования и определение рациональных оросительных норм и режима орошения культур, определяющих сокращение непродуктивных потерь воды за счет инфильтрационного питания грунтовых вод, но не снижающих эффективность орошения;

расширение применения подземного орошения и капельного орошения;

в системе земледелия при орошении обоснование рациональных и экологически безопасных доз и режимов внесения минеральных удобрений;

внесение азотных удобрений только с поливной водой или при условии обязательной заделки в почву;

соблюдение правил хранения, транспортировки и применения удобрений;

увеличение использования бобовых культур в севооборотах, сидератов и других видов зеленых удобрений в качестве средств повышения плодородия почв;

зяблевая вспашка, применение, с учетом особенностей рельефа, водоудерживающих валиков, поперечной и поперечно-гребнистой вспашки, бороздования, кротования, щелевания почвы, а также защитное лесоразведение для предотвращения поступления загрязнений в водные объ-

екты при орошении за счет поверхностного смыва и развития водной эрозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая все более определенные тенденции, подтверждающие климатические изменения, методы управления водными ресурсами, как и сельскохозяйственное производство, необходимо адаптировать к новым условиям для повышения надежности водоснабжения, снижения риска неблагоприятных погодных проявлений (наводнений, засух), обеспечения устойчивости сельского хозяйства и продуктивности сельскохозяйственных угодий. Это обстоятельство имеет большое значение для реализации действующих в сфере сельского хозяйства Государственных программ, адаптируемых для каждого региона РФ. Проведенные исследования по выявлению экологически опасных процессов, связанных с использованием водных ресурсов в пределах российской части бассейна р. Урал, позволили сформулировать предложения по снижению рисков и повышению устойчивости функционирования мелиоративно-водохозяйственных систем. Для обеспечения рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве, повышения эффективности орошаемого земледелия, поддержания и улучшения экологической ситуации на мелиорированных землях в бассейне р. Урал необходим переход на новый технологический уровень управления мелиоративно-водохозяйственным комплексом — что предполагает инновационное комплексное (синхронизированное в пространственно-временном аспекте) управление водными, земельными ресурсами, мелиоративными системами при широком применении информационно-коммуникационных и цифровых технологий в процессе обоснования и принятия решений. При этом для анализа фактических проблем мелиоративных и водохозяйственных систем бассейна р. Урал необходимо проведение технико-технологического аудита мелиоративно-водохозяйственного комплекса по областям региона, на его основе — определение первостепенных мероприятий по повышению эффективности работы ГМС с длительным сроком эксплуатации, определение объемов и видов работ по модернизации мелиоративно-водохозяйственных систем, оценка потребности в дренаже на мелиорированных землях. Для развития мелиора-

тивно-водохозяйственного комплекса российской части бассейна р. Урал необходима разработка информационно-экспертной ГИС-веб-системы поддержки принятия решений по интегрированному управлению водными ресурсами в Республике Башкортостан, Оренбургской и Челябинской областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адельмурзина И.Ф., Косолапов А.Е., Калиманов Т.А., Шефер Е.А., Ридель С.А.* О возможности изменения современных режимов водохранилищ на реке Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 2. С. 68–79.
2. *Безднина С.Я.* Научные основы оценки качества воды для орошения. Рязань: Мещерский науч.-техн. центр, 2013. 171 с.
3. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 1 мая 2022 года). Кодекс РФ от 03.06.2006 № 74-ФЗ.
4. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Республике Башкортостан в 2018 году. Уфа: Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан, 2019. 247 с.
5. *Данилов-Данильян В.И., Веницианов Е.В., Беляев С.Д.* Некоторые проблемы снижения загрязнения водных объектов от диффузных источников // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 493–502.
6. *Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. Ситуация в России // Вестн. РАН. 2023. Т. 93. № 11. С. 1032–1046.
7. *Дедова Э.Б.* Зональная шкала оценки качества поливных вод Республики Калмыкия // Синергия. 2018. № 1. С. 88–95.
8. Доклад о мелиоративном состоянии Российской Федерации в 2020 году. М.: Росинформагротех, 2022. 384 с.
9. Доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году”. М.: Росводресурсы, НИА-Природа, 2022. 510 с.
10. *Дроздов О.А.* Картографический метод в климатологии // Метеорология и гидрология. 1957. № 2. С. 44–48.
11. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. М.: Росинформагротех, 2020. 23 с.

12. Дубенок Н.Н., Ольгаренко Г.В. Перспективы восстановления мелиоративного комплекса Российской Федерации // Вестн. российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 2. С. 56–59.
13. Дубинина В.Г., Косолапов А.Е., Скачедуб Е.А., Коронкевич Н.И., Чебанов М.С. Методические подходы к экологическому нормированию безвозвратного изъятия речного стока (попуска) // Вод. хоз-во России. 2009. № 3. С. 26–60.
14. Изменение Климата России [Электронный ресурс]. <http://climatechange.ru> (дата обращения: 26.09.2022)
15. Информационный портал ВНИИ “Радуга”. <http://inform-raduga.ru>
16. Кац Д.М. Режим грунтовых вод в орошаемых районах и его регулирование. М.: Колос, 1963. 364 с.
17. Кизяев Б.М., Исаева С.Д. Водобеспеченность Российской Федерации в условиях глобального потепления климата // Вестн. РАН. 2016. № 10. С. 909–914.
18. Климентьев А.И. Почвенно-географическое районирование Оренбургской области // Вопросы степеведения. 2002. № 3. С. 83–94.
19. Кононов В.М. Агроэкологическая оценка земель Оренбургской области и принципы формирования адаптивного земледелия. Автореф. дис. ... доктор с.-х. наук. Уфа: Башкирский гос. Агроун-т, 2004. 52 с.
20. Косолапов А.Е., Калиманов Т.А., Шефер Е.А., Ридель С.А. О возможности изменения современных режимов водохранилищ на реке Урал // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 2. С. 68–79.
DOI: 10.35567/19994508_2022_2_6
21. Комиссаров А.В., Комиссаров М.А. Изменение свойств почв при лиманном орошении в степном Зауралье Республики Башкортостан // Плодородие. 2013. № 6. С. 47–50.
22. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Надеждина Е.Д., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. 2014. № 575. С. 65–118.
23. Методические рекомендации. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. РД 52.24.643-2002. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2002. 55 с.
24. Методические рекомендации по оценке геоэкологических рисков при различных сценариях антропогенных воздействий на водные объекты / Под ред. Л.В. Кирейчевой. М.: ВНИИГиМ, 2019. 24 с.
25. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
26. Методы и технологии комплексной мелиорации и экосистемного водопользования / Под ред. Б.М. Кизяева. М.: ВНИИГиМ, 2006. 586 с.
27. Наумова Т.В. Проблемы технического состояния оросительных систем и их решение при переходе на новый технологический уровень управления орошением // Гидротех. стр-во. 2022. № 1. С. 2–4.
28. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. Т. 2. М.: Изд-во МБА, 2019. 476 с.
29. Официальный интернет-портал Минсельхоза России.
http://old.mcх.ru/documents/document/v7_show/14554.133.htm
30. Полянин В.О. Концептуальные подходы к мониторингу диффузного загрязнения водных объектов // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 603–612.
31. Прохорова Н.Б., Косолапов А.Е. Современный водохозяйственный баланс реки Урал на территории Российской Федерации // Вод. хоз-во России. 2011. № 2. С. 4–20.
32. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Урал (Российская часть). Екатеринбург; Новочеркасск: РосНИИВХ, 2010. Утв. приказом Росводресурсов № 65. 01.04.2014.
33. Сивохин Ж.Т. Анализ эколого-гидрологической специфики трансграничного бассейна р. Урал в связи с регулированием стока // Вестн. БГУ. Сер. География. Геоэкология. 2014. № 3.
34. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс].
<https://rosstat.gov.ru/territorialactivity>.
35. Фрумин И.Л., Драчук П.Э. Природно-сельскохозяйственное и экономическое районирование региона с учетом рыночных преобразований (на примере Челябинской области) // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Экономика и менеджмент. 2015. Т. 9. № 1. С. 26–30.
36. Шевченко В.А., Исаева С.Д., Дедова Э.Б. Новый этап развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса Российской Федерации // Вестн. РАН. 2023. Т. 93. № 4. С. 355–361.

37. Шевченко В.А., Исаева С.Д., Дедова Э.Б. Модель принятия решений в инновационных проектах развития сельскохозяйственного водопользования // *Международ. сельскохозяйственный журн.* 2022. Т. 65. № 2 (386). С. 124–128.
38. Dedova E.B., Dedov A.A. Ecological paradigm for sustainable functioning of reclamation systems in arid territories // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Scie.* 2021. V. 867 (1). 012058. doi: 10.1088/1755-1315/867/1/012058
39. Isaeva S.D., Dedova E.B. Principles of ensuring geosystem environmental sustainability under man-made impacts on water resources // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021. V. 867 (1). 012038.
40. Kiselev S., Romashkin R., Nelson G., Mason-D'Croz D., Palazzo A. Russia's Food Security and Climate Change: Looking into the Future // *Economics: The Open-Access, OpenAssessment E-J.* 2013. V. 7. № 2013–39.

SPECIFICS OF THE AVAILABILITY OF WATER RESOURCES FOR AGRICULTURAL WATER SUPPLY UNDER CHANGING CLIMATE CONDITIONS IN THE URAL RIVER BASIN

S. D. Isaeva, E. B. Dedova*

*Kostyakov Federal Research Center for Hydroengineering and Amelioration,
Moscow, 127434 Russia*

**e-mail: dedova@vniigim.ru*

The importance of the study is determined by the need to increase water availability for the agroindustrial complex and rural population with the aim to create conditions for sustainable water use, protect water resources, and reduce ecological–economic risks in the territory of the Ural River basin, taking into account trends in climate changes. The specific features of natural and irrigation–economic factors in the formation of water resources in the territory of the transboundary basin of the Ural River (the Republic of Bashkortostan, Chelyabinsk and Orenburg regions) were analyzed and showed a steady rise of air temperature in the recent 30–130 years. Assessment of the current state of water bodies, the operation regimes of hydroengineering structures, and the ecological conditions of ameliorated lands in the area of 140 thousand ha revealed the deterioration of the technical conditions of amelioration systems due to physical wear and tear. Water balance in the drainage area of the transboundary basin of the Ural River under natural conditions and under irrigation, as well as specific features of agricultural water supply were analyzed. The types of ecological hazard are considered, which can cause economic risks at water use, including possible deficiency of water resources, groundwater level rise, land underflooding, secondary salinization, alkalinization, and diffuse pollution of water bodies. Relationships are given for calculating single-time risks, e.g., flooding with water from catastrophic floods, and permanent risks, such as secondary salinization, alkalinization, underflooding, etc. A relationship is proposed for integral estimation of the space and time development of ecological-economic risks. The studies aimed to reveal ecologically hazardous processes, associated with the use of water resources within the Russian part of the Ural River basin enabled formulating proposals for reducing risks and increasing the operation stability of amelioration and water management systems.

Keywords: melioration-water management complex, hydromelioration systems, ecosystem water use, agriculture, melioration, ecological risk.

Принята к публикации 03.04.2024 г.

DOI: 10.31857/S0321059624050044 EDN: VXUISU

583

на Урала и в нижнем течении в зоне транзитного стока. С конца 2000-х гг. начался маловодный период, связанный с потеплением и ростом потерь воды на испарение, а также более низким весенним половодьем [7]. Многолетние изменения годового стока рек в бассейне р. Урал имеют признаки цикличности продолжительностью 20–30 лет. Соответственно в ближайшие 10–15 лет вероятно формирование фазы повышенного стока рек. Многолетняя динамика количества осадков характеризуется отсутствием однонаправленных и статистически значимых трендов. Явно прослеживается тенденция увеличения доли осадков холодного периода года [13].

Анализ количества публикаций, в которых отражены существующие физически обоснованные оценки будущих изменений стока р. Урал при прогнозируемом изменении климата, показал их крайнюю скудность. В [10] с помощью климатической модели ИФА РАН отмечено, что годовое стока Урала к концу XXI в. при сценарии антропогенных воздействий SRES A2 может возрасти на 27%, а при сценарии B2 изменение оценено в 8%. В [14] с использованием воднобалансовой модели ГГИ получено увеличение стока Урала на 10% по сценарию SRES A2 для периода 2010–2039 гг. относительно 1946–1977 гг.

В [1] выполнена оценка возможных изменений стока р. Урал к середине и концу XXI в. по данным о температуре и осадках, полученным на ансамбле из 11 моделей CMIP5 при реализации сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5. Для расчетов использована методика, основанная на применении комплекса воднобалансовых зависимостей, в том числе формулы расчета испарения Тюрка–Мезенцева. Наибольшие изменения приходятся на стокоформирующую зону бассейна в верхнем и среднем течении. Только на небольших участках в верховьях бассейна в горной части Урала ожидается сохранение современных значений годового речного стока, у г. Оренбурга сокращение стока в 2 раза, у г. Орска — в 3 раза. По схожей методике получены результаты в [6]: к середине XXI в. следует ожидать общего сокращения стока рек в бассейне р. Урал по отношению к его величине в 1961–1989 гг. При среднем варианте развития большая часть бассейна попадает в область уменьшения стока на 10–20%, и только

на южных окраинах, где рек практически нет, ожидается более серьезное его уменьшение. При наилучшем варианте годовое стока рек сократится на 5–10% в северной части бассейна и на 10–15% — в южной. При наихудшем варианте стока уменьшится на >30% во всем бассейне. На юге бассейна ожидается уменьшение стока половодья на >50%, а на северо-востоке на <10%. При наилучшем варианте не исключено увеличение стока весеннего половодья до 10% на северо-востоке, а вероятность прохождения высоких половодий может вырасти в 2 раза.

В [4] возможное изменение стока р. Урал оценивалось до 2050 г. при сценариях RCP 4.5 и RCP 8.5. с помощью процедуры нормирования стока. Используя величину осадков за период 2021–2050 гг., а также коэффициент стока 0.17, рассчитанный за период 1990–2019 гг., был восстановлен средний естественный стока р. Урал. Стока р. Урал в зоне его формирования уменьшится в среднем на 7–11%. Таким образом, существующие оценки возможных изменений годового стока р. Урал, полученные с помощью только глобальных климатических моделей либо воднобалансовых методов, находятся в очень широком диапазоне неопределенности — от –50% до +27%.

Основные регуляторы стока р. Урал — Верхнеуральское и Ириклинское водохранилища, имеющие полезный объем 0.57 и 2.76 км³ соответственно, что позволяет им осуществлять многолетнее регулирование. Гидроузел, образующий Ириклинское водохранилище, контролирует стока с водосбора площадью 36900 км², что составляет 16% всей площади бассейна р. Урал. Помимо двух указанных водохранилищ многолетнее регулирование осуществляют также несколько водохранилищ, расположенных на притоках: Кумакское (или Верхне-Кумакское) на р. Большой Кумак, Черновское на р. Черной, Сакмарское на р. Сакмаре, Юшатырское на р. Большой Юшатырь. Также два водохранилища многолетнего регулирования эксплуатируются в бассейне р. Илек на территории Казахстана: Актюбинское и Каргалинское. Общая площадь водосбора, контролируемая перечисленными водохранилищами, составляет почти 13000 км², а их суммарный полезный объем равен 0.7 км³.

Таким образом, бассейн р. Урал до г. Оренбурга и бассейн р. Илек имеют относительно высокую зарегулированность, а крупнейший правый приток Урала — р. Сакмара зарегулирован слабо. Влияние Ириклинского водохранилища на сток р. Урал в период межени распространяется до г. Оренбурга, в период половодья — до г. Орска.

Анализ фактических режимов наполнения и сбросов Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ показал, что средний объем сбросов относительно нормального подпорного уровня (НПУ) за период 2001–2022 гг. в Верхнеуральском водохранилище составил 0.132 км^3 (или 23% полезной емкости), в Ириклинском — 1.16 км^3 (или 42% полезной емкости). Соответственно, водные ресурсы водохранилищ за указанный период использовались не полностью.

МЕТОДИКА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования физически обоснованных изменений водного режима использовалась модель формирования стока ECOMAG [9], которая была ранее адаптирована для различных рек Европейской и Азиатской частей России [15]. Построение модельной речной сети и схематизация бассейна р. Урал выполнялись на основе цифровой модели рельефа с пространственным разрешением 1 км. В качестве граничных условий в модели заданы многолетние ряды среднесуточных величин температуры и влажности приземного воздуха, количества атмосферных осадков, измеренных на 59 метеостанциях. Модель в непрерывном режиме рассчитывает поля снежного покрова, увлажнения, промерзания и оттаивания почвы, снеготаяния, поверхностный склоновый сток и его трансформацию по русловой сети. Калибровка параметров модели формирования стока проводилась по данным о притоке воды в Верхнеуральское, Магнитогорское и Ириклинское водохранилища и о расходе воды в створах Сакмара — с. Татарская Каргала и р. Урал — г. Оренбург с учетом сбросов Ириклинской ГЭС за период 2001–2011 гг. Независимая проверка модели осуществлялась для периода 1968–2000 гг. по критерию Нэша—Сатклифа NSE. Качество расчетов тем лучше, чем ближе значение NSE к единице.

Для проведения численных экспериментов с гидрологической моделью бассейна р. Урал привлечены среднесуточные данные температуры и влажности воздуха, суммы осадков по ансамблю четырех глобальных моделей климата CMIP5 (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5) по результатам проекта ISIMIP. Данные подготовлены путем приведения первичных расчетных среднесуточных метеорологических данных за исторический период к данным реанализа по процедуре “bias-correction”, описанной в [18]. Данные на будущий период представляют собой проекции климата в узлах пространственной сетки 0.5° до 2099 г. при разных сценариях возможных изменений концентраций парниковых газов. При этом были выполнены расчеты по умеренному, с точки зрения роста глобальной температуры воздуха, сценарию RCP 4.5, которому наиболее соответствует текущий темп потепления в Европейской части России, и по наиболее экстремальному сценарию RCP 8.5.

При проведении численных экспериментов были оценены изменения температуры воздуха и количества осадков для бассейна р. Урал в течение XXI в. относительно величин, определенных для базового периода 1976–2005 гг. Расчеты среднебассейновых метеовеличин были проведены по каждой климатической модели, после чего проводилось усреднение по ансамблю для соответствующего RCP-сценария и 30-летнего периода в ближайшей перспективе (2021–2050 гг.) и конце XXI в. (2070–2099 гг.). Данные климатических моделей задавались в качестве входных в модель формирования стока р. Урал, с помощью которой рассчитывались характеристики водного режима с суточным шагом. Расчеты проводились с теми же параметрами, что были установлены на этапе тестирования модели по данным метеостанций. Предварительно с помощью модели формирования стока при использовании сеточных данных климатических моделей было оценено воспроизведение годового и сезонного речного стока по данным наблюдений в интересующих створах: Ириклинская ГЭС, г. Оренбург, замыкающий створ на р. Сакмаре, приграничный створ на р. Урал ниже впадения р. Илек. Анализ результатов по изменению стока проводился по следующим характеристикам: объем

стока за период весеннего половодья, лета—осени, зимы и соответствующие продолжительности; средний максимальный расход в году и дата его формирования; минимальный расход воды теплого периода года. Водосборная площадь в створах Верхнеуральского и Магнитогорского гидроузлов мала для того, чтобы использовать данные глобальных моделей климата по их расчетной сетке в гидрологической модели для учета пространственной составляющей изменения климатических характеристик.

Для выполнения водохозяйственных расчетов по р. Урал использовалась имитационная модель, разработанная на базе программного комплекса VOLPOW [2]. Модель реализует решение уравнения водного баланса по расчетным интервалам времени. Оценка современных возможностей регулирования стока водохранилищами на р. Урал осуществлялась по рядам полезного притока в Верхнеуральское, Магнитогорское и Ириклинское водохранилища за период 2001/2002–2021/2022 гг. на декадном интервале. Для оценки возможности регулирования стока Ириклинским водохранилищем и показателей его работы в условиях прогнозируемых изменений климата водохозяйственные расчеты выполнялись с использованием 30-летних рядов среднесуточного притока воды на декадном интервале по RCP 4.5 и RCP 8.5 в ближайшей перспективе и конце XXI в. Изменения годового стока определены относительно базового периода 1976–2005 гг. Среднегодовое годовое стока, рассчитанный по модели его формирования в естественных условиях без регулирования выше Ириклинского водохранилища за указанный период, составил 1.99 км³, или на 20% больше, чем фактическая норма стока 1.66 км³ за период 1948–2014 гг. [11] из-за превышения снегозапасов на водосборе согласно данным климатических моделей. В связи с этим

была выполнена корректировка сценарных гидрографов в створе Ириклинского гидроузла. Для этого указанные гидрографы были приведены по объему стока к фактической норме 1.66 км³. Затем ординаты были увеличены на величину изменения стока (в процентах) по соответствующему климатическому сценарию по сравнению с базовым периодом (табл. 1). Для сценарных расчетов формирования стока р. Урал ниже Ириклинской ГЭС в XXI в. в модели ECOMAG в створе гидроузла задавались сбросные расходы, определенные по модели VOLPOW на основе регулирования притока воды в водохранилище. При выполнении водохозяйственных расчетов величина годового слоя потерь на испарение была принята 363 мм в соответствии с данными для водосбора р. Урал до г. Оренбурга, приведенными в [3]. Потери на безвозвратное водопотребление взяты на 25% меньше, чем фактические значения, рассчитанные по данным статистической формы 2-ТП (водхоз) в соответствии с ситуационным прогнозом изменения показателей водопользования в среднесрочной и долгосрочной перспективе, согласно которому к 2030 г. ожидается снижение суммарного объема использования воды на все нужды на 25.5% [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Моделирование формирования стока

В табл. 2 приведены значения критериев соответствия фактических и рассчитанных гидрографов для периодов калибровки и валидации модели.

За базовый период (1976–2005 гг.) внутригодовой ход температуры воздуха воспроизведен климатическими моделями с погрешностью в пределах 0.5°C. По осадкам есть систематиче-

Таблица 1. Изменение объема годового стока р. Урал в створе Ириклинского гидроузла для разных климатических сценариев и периодов XXI в.

Сценарий/период	RCP 4.5 2021–2050 гг.	RCP 4.5 2070–2099 гг.	RCP 8.5 2021–2050 гг.	RCP 8.5 2070–2099 гг.
Среднегодовой сценарный сток, км ³	2.20	2.22	2.20	2.29
Изменение стока относительно 1976–2005 гг., %	+10.4	+10.8	+10.3	+14.9
Сток скорректированных гидрографов, км ³	1.83	1.84	1.83	1.91
Среднегодовое годовое стока скорректированных гидрографов, м ³ /с	58.1	58.3	58.1	60.5

Таблица 2. Значения критериев соответствия суточных гидрографов за периоды калибровки 2001–2011 гг. и валидации 1968–2000 гг. модели в бассейне р. Урал

Река – створ	Площадь водосбора, км ²	Калибровка	Валидация
Урал – Верхнеуральский гидроузел	4300	0.73	Нет данных
Урал – Магнитогорский гидроузел	6400	0.66	Нет данных
Урал – Ириклинский гидроузел	36900	0.51	0.46
Урал – г. Оренбург	82300	0.65	0.75
Сакмара – с. Татарская Каргала	29600	0.65	0.73

ские погрешности: по зимним и весенним 3–5%, по летне-осенним 11%. Климатические модели в среднем завышают величину дефицита влажности воздуха летом на 14%. Сток Урала до Оренбурга, по результатам моделирования с использованием данных глобальных климатических моделей, относительно расчета по данным метеостанций завышен в период весеннего половодья, а сток Сакмары, наоборот, занижен. Для приграничного створа эти погрешности во многом компенсируют друг друга: систематическая погрешность годового стока $\leq 2\%$.

Оценка изменений среднебассейновых климатических характеристик в ближайшей перспективе и в конце XXI в. относительно исторического периода показала следующие результаты. Отмечен рост как среднегодовой, так и сезонной температуры воздуха, а также увеличение годовой и сезонной суммы осадков. Согласно RCP 4.5, в ближайшей перспективе рост среднегодовой температуры воздуха составит 2.3°C, к концу XXI в. – 3.7°C, а согласно RCP 8.5 – 2.7°C и 6.2°C соответственно. По умеренному сценарию увеличение годовой суммы осадков составит 11–14%, а по наиболее экстремальному сценарию – 11–19%. Разница в потеплении между сценариями RCP 4.5 и RCP 8.5 более существенна, чем в изменчивости увлажнения территории бассейна р. Урал. Наибольший темп потепления соответствует зимне-весеннему периоду. В XXI в. летом и осенью рост температуры воздуха в среднем меньше на 0.8–1.4°C. Величина потепления составляет от 2°C для летне-осеннего периода в 2021–2050 гг., согласно RCP 4.5, до почти 7°C для зимне-весеннего периода в 2070–2099 гг., согласно RCP 8.5. Наибольший (в процентах) вклад в увеличение увлажнения территории бассейна р. Урал вносит зимний период (от 7 до 40%), наименьший – осень (от 3 до 9%), согласно обоим RCP-сценариям. В течение XXI в. отмечен интенсивный рост зимних осадков, в то время как

для остальных сезонов характерно относительно равномерное увеличение осадков.

Среди четырех ключевых речных створов, согласно RCP 4.5, зафиксировано наибольшее относительное увеличение годового стока на Урале до впадения р. Сакмары (11–14%) и наименьшее на Сакмаре (7–11%). По RCP 8.5, увеличение годового стока в разных створах более равномерное, несколько выделяется меньшая величина по притоку воды в Ириклинское водохранилище в конце XXI в. (15%). В приграничном створе отмечено увеличение годового стока р. Урал на 9% в ближайшей перспективе при реализации обоих RCP-сценариев и на 13–18% в конце XXI в. Схожие результаты оценки гидрологических последствий изменения климата в течение XXI в. получены для рек со значительной долей формирования стока на территории Уральских гор [16, 17]. Далее приведены оценки изменения внутригодового стока в бассейне р. Урал (рис. 2).

По RCP 4.5, увеличение объема притока в Ириклинское водохранилище за период весеннего половодья составит 9–14% с продолжительностью на 10–12 сут больше. Максимальный приток возрастет на 10–21% с датой формирования на 10–12 сут раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 15% и сократится на 7% в ближайшей перспективе и конце XXI в. соответственно, а его продолжительность увеличится на 2–6 сут. Минимальный летне-осенний расход воды сократится на 16–18%. Объем зимнего стока увеличится на 5–41% при сокращении продолжительности на 2 недели. По RCP 8.5, вероятность реализации которого меньше, чем у RCP 4.5, увеличение объема притока в Ириклинское водохранилище весной составит 10–14% с продолжительностью на 8–10 сут больше. Максимальный приток возрастет на 17–27% с датой

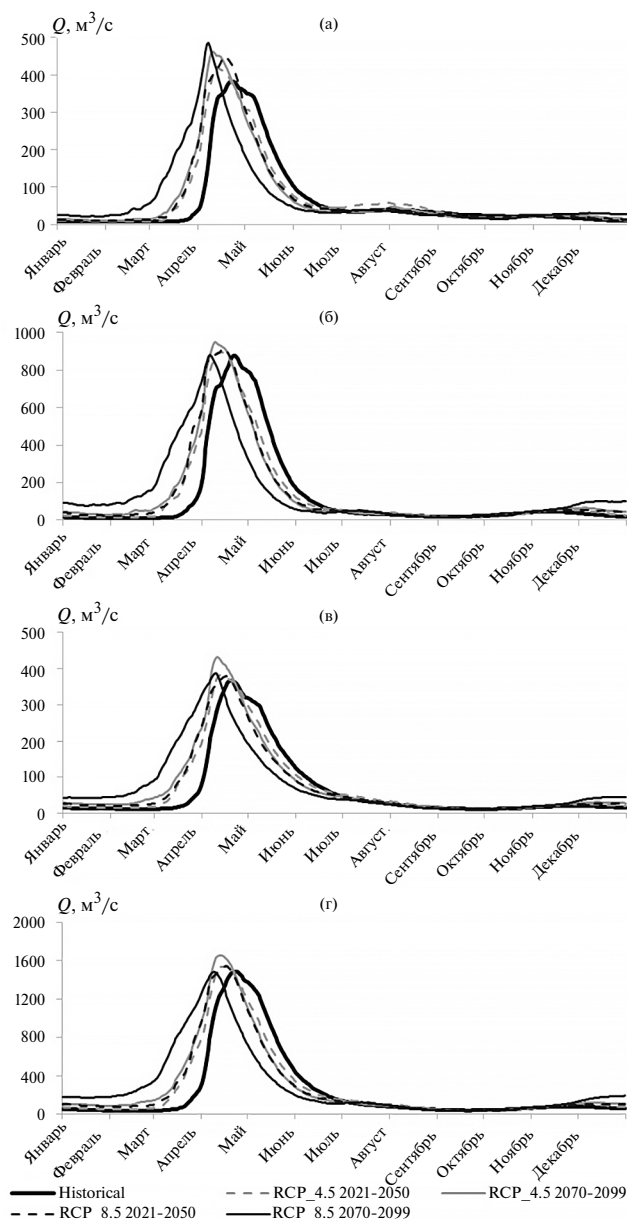


Рис. 2. Приток воды в Ириклинское водохранилище (а), сток р. Сакмары (б) и р. Урал у г. Оренбурга (в) и в приграничном створе ниже впадения р. Илек (г) в среднем за 2021–2050 и 2070–2099 гг. согласно RCP 4.5 и RCP 8.5 и 1976–2005 гг. (“historical”).

формирования на 5–15 сут раньше. Объем летне-осеннего стока останется почти неизменным в ближайшей перспективе и увеличится на 11% в конце XXI в., а его продолжительность увеличится на 8–39 сут. Минимальный летне-осенний расход воды сократится на 13–28%. Объем зимнего стока увеличится на 19–78% при сокращении продолжительности на 0.5–1.5 мес.

При реализации RCP 4.5 увеличение объема стока весеннего половодья на Сакмаре составит 3–5% с продолжительностью на 3–9 сут больше. Максимальный расход воды возрастет на 2–8% с датой формирования на 9–12 сут раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 12–18%, а его продолжительность — на 1–3 недели. Минимальный летне-осенний расход воды сократится на 16–23%. Объем зимнего стока увеличится на 29–85% при сокращении продолжительности на 17–24 сут. По RCP 8.5, увеличение объема стока весеннего половодья на Сакмаре составит 2–6% с продолжительностью на 7–9 сут больше. Максимальный сток возрастет на 5% с датой формирования на 6–15 сут раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 12–37%, а его продолжительность — на 14–44 сут. Минимальный летне-осенний расход воды сократится на 12–14%. Объем зимнего стока увеличится на 57–161% при сокращении продолжительности на 3–7 недель.

При RCP 4.5 в ближайшей перспективе весенний сток Урала у г. Оренбурга относительно исторического периода сократится на 6% с продолжительностью на 5 сут меньше, а в конце XXI в. объем и продолжительность стока почти не изменятся. Максимальный расход воды уменьшится на 7% и возрастет на 5% в 2021–2050 и 2070–2099 гг. соответственно с датой формирования на 6–8 сут раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 50–70% за счет повышенных сбросных расходов Ириклинской ГЭС, а его продолжительность — на 2 недели. Минимальный летне-осенний расход воды увеличится на 55–68%. Объем зимнего стока возрастет на 17–20% при сокращении продолжительности на 1–2 недели. По RCP 8.5, в ближайшей перспективе весенний сток Урала у Оренбурга сократится на 3–5% с продолжительностью на неделю больше, а в конце XXI в. на 2 сут меньше. Максимальный расход воды уменьшится на 1–9% с датой формирования на 2–8 сут раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 56–67% за счет повышенных сбросных расходов Ириклинской ГЭС, а его продолжительность — на 10–26 сут. Минимальный летне-осенний расход воды увеличится на 70–80%. Объем зимнего стока увеличится на 19–53% при сокращении продолжительности на 17–24 сут.

По RCP 4.5 весенний сток Урала в приграничном створе ниже впадения р. Илек почти не изменится. Максимальный расход воды увеличится на 1–8% с датой формирования на 4–10 сут раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 40%, а его продолжительность — на 14–25 сут. Минимальный летне-осенний расход воды увеличится на треть. Объем зимнего стока увеличится на 11–34% при сокращении продолжительности на 18–26 сут. При RCP 8.5 весенний сток Урала на границе с Казахстаном — без изменений. Максимальный расход воды почти не изменится с датой формирования на 1–2 недели раньше. Объем летне-осеннего стока увеличится на 45–58%, а его продолжительность — на 26–40 сут. Минимальный летне-осенний расход воды увеличится на 40–50%. Объем зимнего стока увеличится на 24–72% при сокращении продолжительности на 4–7 недель.

Водохозяйственные расчеты

Для оценки соответствия фактических режимов работы Верхнеуральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ действующим правилам использования водных ресурсов (ПИВР) выполнены водохозяйственные расчеты за период 2001/2002–2021/2022 гг., где режимы работы водохранилищ задавались в соответствии с диспетчерскими графиками из действующих ПИВР. По результатам расчетов вычислены уровни воды, которые на конец расчетного периода в Верхнеуральском водохранилище оказались на 1.53 м выше фактических, в Ириклинском — на 0.74 м выше фактических. То есть фактическая отдача водохранилищ была больше, чем предусмотрено правилами, однако это не привело к глубокой сработке водохранилищ. Главная причина такого результата — существенное снижение безвозвратного водопотребления, наблюдающееся в последние 10 лет.

Кроме количественного изменения в водопотреблении, в последние годы изменились и требования к внутригодовому распределению отдачи водохранилищ. Как показывает практика управления режимами Ириклинского водохранилища, в современных условиях имеется возможность отказаться от сбросов 25–30 м³/с в зимний период, которые предусмотрены дей-

ствующими ПИВР, и ограничиться санитарным попуском 15 м³/с, а освободившиеся водные ресурсы использовать в летний период. Такой режим осуществлялся фактически в 2021/2022 и 2022/2023 гг. Согласно действующим ПИВР, целью увеличенного зимнего пуска из Ириклинского водохранилища является, в том числе, “формирование благоприятного для воспроизводства осетровых рыб режима расходов в низовьях р. Урал и интересов сельского хозяйства Казахской ССР”. Однако, как следует из [5], в современных условиях Республика Казахстан требует увеличить летние пуски из Ириклинского водохранилища, а нерестилища осетровых рыб в основном расположены ниже с. Илек, где гидравлический режим в большей мере определяется стоком р. Сакмары, чем сбросами из Ириклинского водохранилища. Указанные факторы позволяют внести следующие изменения в диспетчерские графики Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ: увеличить гарантированную отдачу за счет уменьшения безвозвратного водопотребления и увеличить сбросы в весенний период за счет уменьшения зимнего пуска.

Корректировка диспетчерских графиков Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ осуществлялась по результатам вариантных водохозяйственных расчетов по ряду фактического притока воды в водохранилища с декадным интервалом за период 2001/2002–2021/2022 гг. В расчетах было принято, что Магнитогорское водохранилище работает в режиме поддержания уровня воды в период с июня по сентябрь включительно в пределах отметок 350.9–351 м, в остальное время года — в пределах отметок 350–351 м, минимальный расход в нижний бьеф при этом составляет 1.5 м³/с. Исходный диспетчерский график Верхнеуральского водохранилища, содержащийся в действующих ПИВР, имеет схематичную структуру и состоит из двух горизонтальных линий, отделяющих зоны сниженной, гарантированной отдачи и полного открытия водосброса. В ходе корректировки на диспетчерском графике была намечена отметка принудительной предполоводной сработки 379.95 м, добавлена зона повышенной отдачи с расходом 30 м³/с, предусмотрен сдвиг границы зон гарантированной и повышенной отдачи в зависимо-

сти от даты начала половодья. Гарантированная отдача по результатам расчетов принята равной $7 \text{ м}^3/\text{с}$. Полученный вариант скорректированного диспетчерского графика Верхнеуральского водохранилища приведен на рис. 3. Нижняя граница зоны гарантированной отдачи проведена приблизительно, так как короткий ряд, на котором выполнялись расчеты, не позволяет оценить перебои обеспеченностью 95% и более и соответствующее число лет попадания в зону сниженной отдачи.

Для Ириклинского водохранилища разработано два варианта диспетчерского графика на гарантированную отдачу $22.9 \text{ м}^3/\text{с}$. Оба варианта имеют одинаковое количество режимных зон и координаты их границ. Отличие состоит в распределении расходов внутри зоны гарантированной отдачи. В первом варианте (рис. 4а) с апреля по октябрь водохранилище работает с отдачей $25\text{--}35 \text{ м}^3/\text{с}$, с ноября по март отдача равна $15 \text{ м}^3/\text{с}$. Во втором варианте (рис. 4б) в зоне гарантированной отдачи предусмотрена подзона осуществления специального попуска объемом 326 млн м^3 . Сроки начала и завершения специального попуска устанавливаются в зависимости от даты начала половодья. После завершения специального попуска водохранилище переходит на сброс $15 \text{ м}^3/\text{с}$.

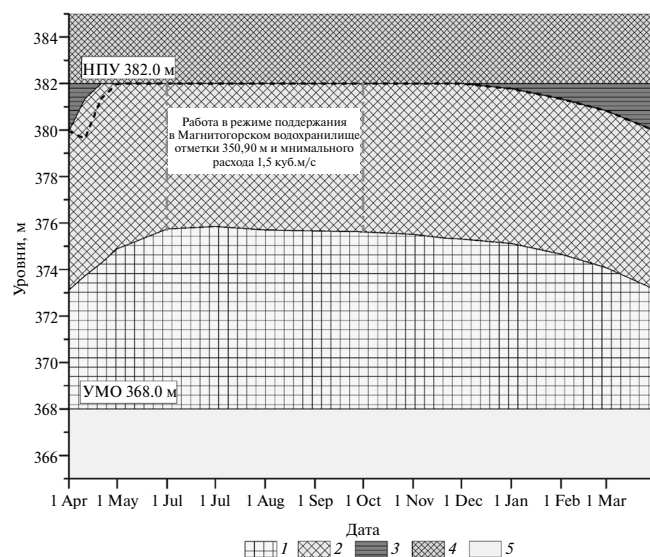


Рис. 3. Проект диспетчерского графика Верхнеуральского водохранилища. 1 – зона неиспользуемого объема; 2 – зона сниженной отдачи: $1.9 \text{ м}^3/\text{с}$ IV–X, $3 \text{ м}^3/\text{с}$ XI–III; 3 – зона гарантированной отдачи $7 \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – зона повышенной отдачи $30 \text{ м}^3/\text{с}$; 5 – зона полной пропускной способности.

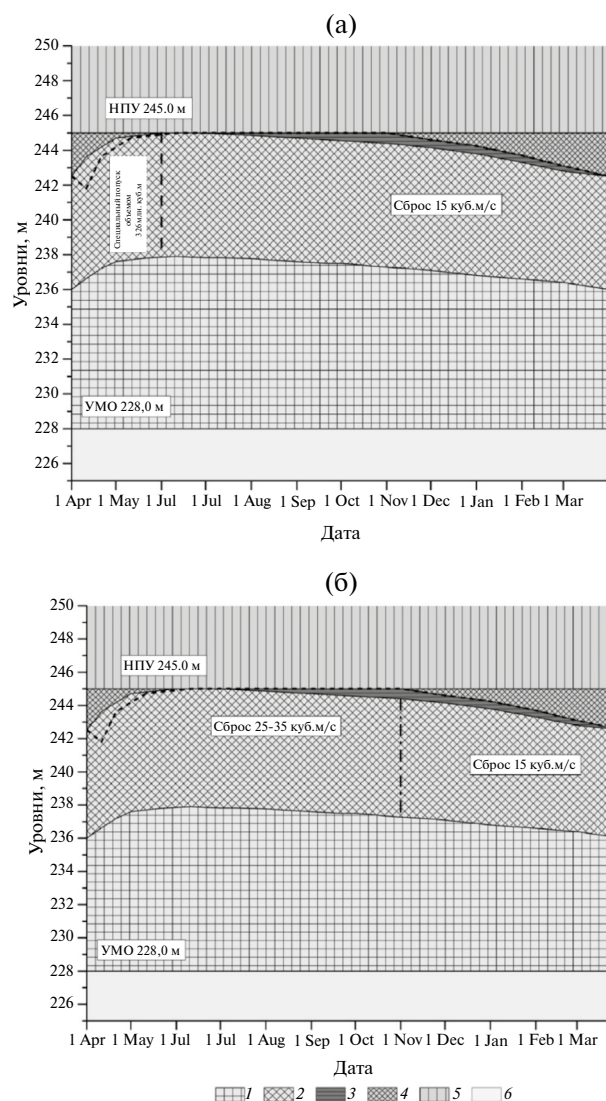


Рис. 4. Варианты диспетчерского графика Ириклинского водохранилища: а – осуществление спецпопуска объемом 326 млн м^3 ; б – с апреля по октябрь расход $25\text{--}35 \text{ м}^3/\text{с}$, зоны: 1 – неиспользуемого объема; 2 – сниженной отдачи $15 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – гарантированной отдачи $22.9 \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – повышенной отдачи $35 \text{ м}^3/\text{с}$; 5 – полной загрузки ГЭС; 6 – полной пропускной способности.

Уровень принудительной предполоводной сработки назначен на отметке 242.5 м , что на 0.6 м меньше, чем в действующих ПИВР. Для более гибкого управления весенним наполнением Ириклинского водохранилища на уточненном диспетчерском графике предусмотрен сдвиг границы зон гарантированной и повышенной отдачи в случае начала половодья во второй декаде апреля и позже (пунктирная линия на рис. 4). В зоне полной загрузки ГЭС отдача назначается в диапазоне

от 75 до 100 м³/с, что соответствует полной пропускной способности трех и четырех гидроагрегатов. В настоящее время на Ириклинской ГЭС работает 3 гидроагрегата.

Основные показатели работы Ириклинского водохранилища, рассчитанные по 22-летнему гидрологическому ряду для диспетчерского графика из действующих ПИВР и для доработанных диспетчерских графиков, приведены в табл. 3. Увеличение глубины предполоводной сработки Ириклинского водохранилища позволило снизить расчетные максимальные среднедекадные расходы по сравнению с расчетами по диспетчерскому графику из действующих ПИВР. В первом варианте диспетчерского графика максимальный среднедекадный расход снизился с 1140 до 930 м³/с, во втором варианте диспетчерского графика – до 1070 м³/с.

За счет более глубокой сработки Ириклинского водохранилища снижаются объемы холостых сбросов относительно регулирования по действующим правилам, что приводит к увеличению средней годовой выработки электроэнергии на Ириклинской ГЭС. При этом гарантированная зимняя мощность обеспеченностью 95% получается меньшей, поскольку уменьшается попуск в зимний период.

Что касается показателей специального попуска во втором варианте регулирования, то, согласно рис. 5, обеспеченность его принятого объема 326 млн м³ составляет 83%, что укладывается в диапазон нормативной обеспеченности требований рыбного хозяйства 75–90% [8].

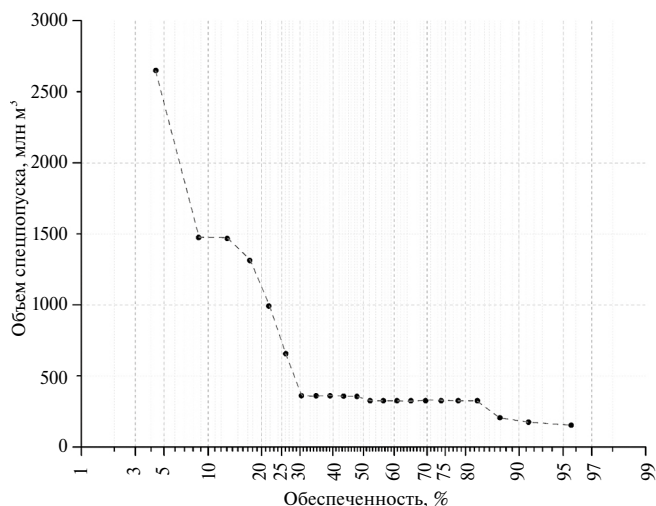


Рис. 5. Обеспеченность объемов спецпопуска из Ириклинского водохранилища.

Для 30-летних рядов притока воды, рассчитанных по климатическим сценариям для Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ и соответствующих периодам 2021–2050 и 2070–2099 гг., определена максимально возможная отдача для прогнозируемых изменений водности. Для Верхнеуральского водохранилища в зависимости от сценария и горизонта планирования получена отдача 11.9–12.6 м³/с, для Ириклинского водохранилища – 41.5–48 м³/с, что существенно превышает гарантированные отдачи 2.7 и 19.5 м³/с, предусмотренные действующими ПИВР Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ соответственно. Далее по сценариям RCP 4.5 и RCP 8.5 для Ириклинского водохранилища был подобран гидрограф сбросов по объему, примерно соответствующий отдаче,

Таблица 3. Основные результаты водноэнергетических расчетов работы Ириклинского водохранилища

Показатель	Действующие ПИВР	Вариант 1	Вариант 2
Средний многолетний сброс, м ³ /с	40.9	40.5	40.5
Максимальный среднедекадный расход, м ³ /с	1140	930	1070
Минимальный среднедекадный расход, м ³ /с	15	15	15
Средний многолетний объем сбросов в период спецпопуска, млн м ³	—	—	613
Средний уровень верхнего бьефа, м	243.97	242.79	243.02
Минимальный уровень верхнего бьефа, м	239.65	237.48	239.09
Средняя годовая выработка электроэнергии, млрд кВтч	69.9	79.8	75.9
Объем холостых сбросов, млн м ³	446	297	344
Зимняя мощность обеспеченностью 95%, МВт	7.2	3.4	4.1

приведенной в табл. 4, и предполагающий повышенные расходы с июня по сентябрь, и выполнены водохозяйственные расчеты. За основу было принято предложение Республики Казахстан по режиму работы Ириклинского гидроузла, опубликованное в [2]. Из результатов расчетов следует отметить существенное снижение максимальных сбросных расходов по сравнению с фактическим сбросом (717 м³/с) и рассчитанным по действующим ПИВР (1140 м³/с), что объясняется снижением как величины, так и изменчивости максимальных расходов, рассчитанных по климатическим сценариям, относительно фактических величин. В остальном результаты расчетов соответствуют ожидаемой водности и принятому режиму работы Ириклинского гидроузла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В XXI в. при реализации сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5 вероятно увеличение годового стока в бассейне р. Урал в рассмотренных четырех ключевых створах относительно периода 1976–2005 гг.: на 7–17% по притоку воды в Ириклинское водохранилище и стоку Сакмары, на 9–19% в зарегулированных створах у Оренбурга и в приграничном после впадения р. Илек. На фоне увеличения количества твердых осадков объем стока весеннего половодья возрастет на 9–14% на водосборе Ириклинского водохранилища, на 2–6% на Сакмаре со слабой изменчивостью на зарегулированных участках р. Урал. В целом современные тенденции увеличения периода ве-

сеннего половодья продолжатся в будущем. Формирование максимального в году расхода воды сдвигается на 1–2 недели раньше: в естественных условиях максимумы растут, в зарегулированных створах снижаются. Объем летне-осеннего стока возрастет на Сакмаре в большей степени, чем на водосборе Ириклинского водохранилища, за счет длительной ветви спада половодья, но особенно сильно на 40–70% на Урале в приграничном створе и у Оренбурга на фоне повышенных сбросных расходов Ириклинской ГЭС, хотя ниже устья Сакмары величина изменений стока ниже. Продолжительность летне-осеннего сезона станет на 1–3 недели больше при RCP 4.5 и на 2–6 недель – при RCP 8.5. Минимальные расходы воды, формирующиеся в сентябре, станут на 10–20% ниже в естественных условиях, а также выше на 50–70% у Оренбурга и на 30–50% в приграничном створе вследствие регулирования стока Ириклинским гидроузлом. По объему зимнего стока характерна тенденция его роста с наибольшими величинами на р. Сакмаре в связи с увеличением осадков поздней осенью и возвратом положительной температуры в декабре после выпадения твердых осадков, что приводит к росту предзимнего увлажнения почвогрунтов на водосборе и повышенным запасам воды в русловой сети к началу года. Продолжительность зимней межени сократится на 2–3 недели при RCP 4.5 и на 3–7 недель при RCP 8.5.

В современных условиях в связи со снижением объемов водопотребления имеется возможность уточнить режимы работы Верхне-

Таблица 4. Основные показатели работы Ириклинского водохранилища по результатам водохозяйственных расчетов в XXI в. для климатических сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5

Показатели	Сценарий и период XXI в.			
	RCP 4.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 8.5
	2021–2050 гг.	2070–2099 гг.	2021–2050 гг.	2070–2099 гг.
Сброс, м³/с				
Средний многолетний	54.4	52.5	54.3	57.1
Максимальный	502	419	355	458
Минимальный	35	30	37	35
Уровень верхнего бьефа, м				
Средний многолетний	243.13	243.54	242.92	243.18
Максимальный	245.00	245.00	245.00	245.00
Минимальный	238.96	238.67	238.68	238.92
Средняя выработка электроэнергии, млн кВтч	129	122	131	132
Зимняя мощность (P = 95%), МВт	9.1	7.8	9.7	9.1

уральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ в части увеличения их гарантированной отдачи. Анализ опыта эксплуатации Ириклинского гидроузла и сведений о влиянии режимов его работы на функционирование нерестилищ осетровых рыб позволяют предложить перераспределить попуски с зимнего периода на теплый период. При увязке режимов работы Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ отдачу последнего можно увеличить с 19.5 м³/с (в действующих ПИВР) до 22.9 м³/с, что позволяет с апреля по октябрь бесперебойно давать в нижний бьеф расходы 25–35 м³/с при попуске в зимний период в размере минимально допустимого расхода 15 м³/с. Дополнительные водные ресурсы Ириклинского водохранилища могут быть использованы для осуществления специального попуска объемом 326 млн м³ с нормативной обеспеченностью 75–90%, установленной для требований рыбного хозяйства, с целью обводнения р. Урал на участке до г. Оренбурга в весенний период. Другое следствие освоения водных ресурсов Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ в связи со снижением объемов водопотребления — возможность увеличения глубины принудительной предполоводной сработки водохранилищ, что позволяет снизить максимальные сбросные расходы в период весеннего половодья.

Водохозяйственные расчеты, выполненные на имитационной модели водохозяйственной системы р. Урал до створа Ириклинского гидроузла, показали, что в XXI в. в случае реализации климатических сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5 и ожидаемого снижения безвозвратного водопотребления в бассейне возможно существенное увеличение отдачи Ириклинского водохранилища. Для сценария RCP 4.5 вероятная величина среднегодового расхода обеспеченностью 95% составит 46.5 м³/с за период 2021–2050 гг. и 41.5 м³/с за период 2070–2099 гг. Для сценария RCP 8.5 отдача может составить 48 и 46.7 м³/с соответственно. За счет увеличения гарантированной отдачи попуски из Ириклинского водохранилища в летне-осенний период могут быть увеличены до 40–55 м³/с, минимальный сбросной расход может быть увеличен до 30 м³/с. Одновременно зафиксировано снижение максимальных расчетных сбросов по сравнению

с фактическими максимальными расходами за период 2001–2023 гг.

Таким образом, по результатам численных экспериментов, в будущем вероятно положительная тенденция для годового стока со значительными внутригодовыми трансформациями прежде всего по продолжительности фаз водного режима. Регулирующая роль водохранилищ в бассейне р. Урал будет возрастать в контексте как борьбы с подтоплениями в зимне-весенний период, так и устранения дефицита водных ресурсов в лимитирующий период конца лета — начала осени. С учетом предвычисленного по физико-математическим моделям увеличения речного стока и смены циклов колебаний стока Урала за исторический период формирования длительных многолетних маловодий в ближайшей перспективе и конце XXI в. не ожидается. Для устойчивого развития водохозяйственного комплекса в бассейне Урала рекомендуется разработка стратегии эффективного регулирования возобновляемых водных ресурсов гидротехническими сооружениями, которая должна опираться на современные средства прогноза развития гидроклиматических условий с использованием мезомасштабных метеорологических моделей, а также пространственно-распределенных моделей формирования речного стока и водохозяйственных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева М.Б., Сидорова М.В., Капустина Е.А. Прогноз стока в бассейне реки Урал в 21 веке // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием “Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана”. Новочеркасск: ЛИК, 2021. С. 18–22.
2. Беднарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое стр.-во. 2017. № 7. С. 22–35.
3. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных бассейнов европейской части России // Вод. хоз-во России. 2018. № 5. С. 36–47.
4. Ивкина Н.И., Галаева А.В., Сауров С.Б., Долгих С.А., Смирнова Е.Ю. Оценка годового стока реки Жайык (Урал) в створе у с. Кушум на перспективу

- до 2050 г. с учетом изменения климата // Гидрометеорология и экология. 2020. № 3. С. 52–69.
5. Косолапов А.Е., Калиманов Т.А., Шефер Е.А., Ридель С.А. О возможном изменении современных режимов водохранилищ на р. Урал // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 2. С. 68–79.
 6. Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова Г.С. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вест. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2018. № 1. С. 90–101.
 7. Магрицкий Д.В., Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Кисебаев Д.К. Научно-прикладное изучение стока рек в бассейне Урала в XX в. – начале XXI в. Ч. 1. Сток и водный режим. Многолетние изменения // Вопр. степеведения. 2023. № 1. С. 25–44.
 8. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ. М.: Минприроды России, 2011. № 17.
 9. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.
 10. Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // ДАН. 2005. Т. 402. № 2. С. 243–247.
 11. Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ / Под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: РПЦ Офорт, 2017. 132 с.
 12. Отчет по НИР № 0173100011322000002 “Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной реки Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)”. М.: ИВП РАН, 2022.
 13. Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилев А.А. Региональные эффекты глобальных изменений климата в бассейне реки Урал // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 509. № 2. С. 265–271.
 14. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Тр. Британско-Росс. конф. “Гидрологические последствия изменений климата”. Барнаул: Пять плюс, 2007. С. 143–151.
 15. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Y.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian rivers under current and projected climate change. 2. Climate change impact on the water regime of Russian rivers in the XXI century // Water Resour. 2022. V. 49. №. 3. P. 351–365. <https://doi.org/10.1134/S0097807822030058>
 16. Kalugin A. Climate change effects on river flow in Eastern Europe: Arctic rivers vs. Southern rivers // Climate. 2023. V. 11. №. 103. <https://doi.org/10.3390/cli11050103>
 17. Kalugin A. Hydrological and meteorological variability in the Volga River basin under global warming by 1.5 and 2 degrees // Climate. 2022. V. 10 (7). №. 107. <https://doi.org/10.3390/cli10070107>
 18. Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) // Geosci. Model Dev. 2019. V. 12. P. 3055–3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>

REGULATION OF THE URAL RIVER FLOW UNDER CURRENT AND PROJECTED CLIMATE CONDITIONS

A. S. Kalugin*, V. V. Chukanov, Yu. G. Motovilov, A. V. Mastryukova, N. O. Popova,
N. N. Chernobrovkin**

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

**e-mail: kalugin-andrei@mail.ru*

***e-mail: 4yk@vodinfo.ru*

The spatially distributed ECOMAG runoff formation model was used to calculate physically based changes in the water regime in the Ural River basin in the XXI century with the use of data of an ensemble of Earth system models and scenarios of anthropogenic impact on the climate system, leading to a considerable decrease in the uncertainty of the existing estimates of the future runoff of the Ural River. Water management calculations for the Ural River were made with the use of the VOLPOW simulation model, which implements the solution of water balance equation by time intervals. The results of variations of the annual and seasonal runoff of the Ural River at different sections were obtained taking into account the effect of the Irikhinskaya Hydropower Station and the Sakmara River under scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 in the nearest future and in the late XXI century. The current potential of runoff regulation in the Ural River by reservoirs was evaluated, and variants of reservoir operation curves for the optimal use of the available water resources are presented. Variants are proposed for adaptation of the rules of runoff regulation by the Irikhinskoe Reservoir and its operation characteristics under expected climate changes in the XXI century, based on water management calculations with the use of long-term series of daily water inflow, determined by the ECOMAG model under scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 relative to the base period 1976–2005.

Keywords: the Ural River, climate change, modeling, runoff regulation, reservoir operation curves.

ОПАСНЫЕ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ДЛЯ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ БАСЕЙНА РЕКИ УРАЛ

© 2024 г. Л. С. Курочкина*, Е. Н. Грек, Т. В. Скороспехова, С. С. Чепикова

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, 199004 Россия

**e-mail: kurochkina_liubov@hydrology.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 08.04.2024 г.

Принята к публикации 20.04.2024 г.

Проведены анализ и оценка опасных и неблагоприятных гидрологических явлений на реках российской части бассейна р. Урала по данным многолетних наблюдений за уловенным режимом на гидрологических постах с установленными критическими уровнями воды. Использована методика, разработанная в Государственном гидрологическом институте, а также предложен обобщенный критерий, позволивший выявить посты с наибольшей опасностью наводнений. Проведенный анализ показал, что для постов, расположенных в селах Ащебутак, Сергиевка, поселках Майском, Адамовка, повторяемость опасных гидрологических явлений >10%, из них наиболее опасные наводнения отмечались для с. Ащебутак и пос. Адамовка. Повторяемость неблагоприятных гидрологических явлений для постов в городах Орске, Кувандыке, пос. Новоорске >50%. Для этих же постов выявлено многократное (до четырех раз за год) превышение отметки в разные фазы водного режима (половодье и паводки). Это указывает на необходимость принятия мер по предотвращению негативного воздействия вод на территориях, подверженных высокому риску затопления. Критические отметки низких уровней воды установлены для двух пунктов на р. Урал — городов Оренбурга и Верхнеуральска. Низший уровень воды поста г. Оренбурга ни разу не опускался ниже отметки опасного гидрологического явления. На посту г. Верхнеуральска на фоне существенных изменений низших уровней воды после 1975 г. уровень воды падал ниже отметки неблагоприятного гидрологического явления 4 раза.

Ключевые слова: критические отметки уровня воды, бассейн реки Урал, повторяемость, категории опасности, превышение, наводнения, маловодья.

DOI: 10.31857/S0321059624050052 **EDN:** VXSJQG

ВВЕДЕНИЕ

На территории России с ее разнообразием климатических условий происходит множество разных опасных гидрометеорологических явлений, которые могут причинить значительный экономический ущерб как отдельным предприятиям, так и отраслям экономики в целом [1, 12, 13]. Своевременное и достоверное информирование о возникновении, развитии, усилении и окончании таких явлений — одна из приоритетных задач наблюдательных подразделений Росгидромета. Гидрологические явления — одни из опаснейших природных процессов по масштабам наносимого ущерба в социально-экономических отраслях. В данной работе рассмотрены опасные и неблагоприятные гидрологические явления (ОГЯ и НГЯ соответственно), происходящие на российской части бассейна р. Урал.

ОГЯ — это результат гидрологических процессов, возникающих под действием раз-

личных природных или гидродинамических факторов или их сочетаний, оказывающих поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду [4]. Гидрологические события, вызывающие менее разрушительные последствия по сравнению с ОГЯ, относят к НГЯ. Такие явления затрудняют деятельность отдельных предприятий и субъектов экономики, создают неудобства для населения, но не представляют угрозу безопасности людей [8].

Наиболее распространенная причина возникновения ОГЯ и НГЯ на территории Российской Федерации — повышение уровня воды на водных объектах в период половодья, паводка, при образовании затора или зажора [7]. ОГЯ и НГЯ также могут возникать при падении уровня воды ниже проектных отметок для водозаборных сооружений и навигационных уровней воды на судоходных реках [8].

Отметки уровней воды, определяющие наступление ОГЯ и НГЯ, устанавливаются для гидрологических постов территориальными органами Росгидромета (УГМС) исходя из требований обслуживаемых ими организаций с учетом природных и климатических особенностей территории и других факторов [8], данных многолетних наблюдений и возникавших ранее негативных последствий наводнений для населения и отраслей экономики [2]. Иными словами, при назначении отметок ОГЯ и НГЯ определяющие факторы — не только высота подъема уровня воды, но и расположение вблизи гидрологического поста населенных пунктов и объектов экономики.

Цель работы — анализ и оценка ОГЯ и НГЯ, произошедших на реках бассейна Урала, по данным многолетних наблюдений за уровнем режимом на гидрологических постах с установленными критериями ОГЯ и НГЯ, а также выявление гидрологических постов с наибольшей повторяемостью и опасностью наводнений.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Урал протекает по территории России и Казахстана. Сток реки — на склонах хребта Уралтау, впадает река в Каспийское море. Территория бассейна р. Урал в границах Российской Федерации имеет площадь 121,9 тыс. км², что составляет 52,8% территории всего бассейна [11].

Основной тип питания большинства рек района — снеговой, вследствие этого естественный режим стока большинства рек бассейна характеризуется высоким весенним половодьем и низкой летней меженью с редкими дождевыми паводками, повышенной водностью в осенний период и резким снижением стока в зимний период. Весеннее половодье в бассейне обычно начинается в конце марта — начале апреля и длится от 30 до 90 дней в зависимости от водности рек и дружности весны. Доля весеннего стока в годовом на разных реках территории колеблется в пределах 55–100%. Наибольшая доля (95–98%) в юго-западной части, наименьшая — в бассейнах верхнего течения Урала и Сакмары (55–75%) [9].

Бассейн р. Урал на территориях как Российской Федерации, так и Республики Казахстан

характеризуется довольно высокой степенью зарегулированности стока. На территории Российской Федерации в бассейне расположено 141 водохранилище объемом >1 млн м³ с суммарным полным объемом 4676 млн м³, а также 674 пруда с общим объемом 116 млн м³ [6].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований использованы материалы многолетних наблюдений за водным режимом на 15 гидрологических постах Росгидромета, расположенных на реках бассейна Урала, с установленными критериями ОГЯ и (или) НГЯ (рис. 1). Из 15 постов для 13 определены отметки, соответствующие как ОГЯ, так и НГЯ. Для оставшихся двух постов отметки ОГЯ и НГЯ совпадают, что можно трактовать как отсутствие установленной отметки НГЯ.

Критические отметки установлены Уральским УГМС и Приволжским УГМС. Для постов, принадлежащих Башкирскому УГМС, не назначены критические отметки по рекам в пределах бассейна Урала. Можно считать, что вблизи постов, где не установлена критическая отметка, ущербы не отмечены. В табл. 1 представлены критические отметки для высших уровней воды

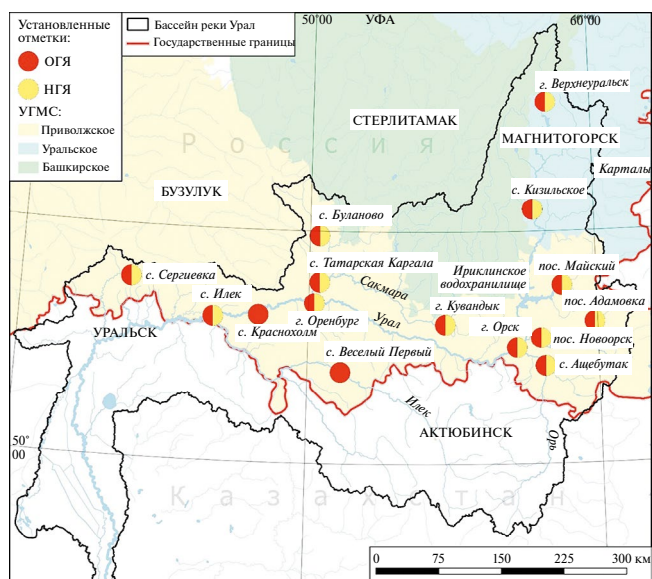


Рис. 1. Расположение гидрологических постов с установленными отметками ОГЯ и НГЯ на территории бассейна р. Урал в границах Российской Федерации.

Таблица 1. Установленные критические отметки для высших уровней воды по состоянию на 2022 г. и низших уровней воды по состоянию на 2021 г. на реках бассейна Урала, площадь (F) и средняя высота водосбора (H_{cp}), отметка нуля поста (H_0) и периоды наблюдений

Код поста	Река – пост	F , км ²	H_{cp} , м [14]	H_0 , м БС	Высшие уровни, см		Низшие уровни, см		Период наблюдений
					ОГЯ	НГЯ	ОГЯ	НГЯ	
19039	р. Урал – г. Верхнеуральск	2650	599	397.33	310	270	145 61*	-5	1931–2020
19049	р. Урал – с. Кизильское	17200	469	289.21	600	520			1927–2020
19054	р. Урал – г. Орск	46100	372	186.11	700	360			1967–2020
19063	р. Урал – г. Оренбург	82300	347	81.6	930	760			1967–2020
19070	р. Урал – с. Илек	119000	334	50.45	890	850			1958–2020
19118	р. Суундук – пос. Майский	4020	344	248.63	900	880			1970–2020
19127	р. Большой Кумак – пос. Новоорск	7250	323	203.1	690	390			1967–2020
19128	р. Жарлы – пос. Адамовка	2490	347	264.42	700	560			1948–2020
19136	р. Орь – с. Ашебутак	16700	322	201.71	850	620			1981–2012
19156	р. Сакмара – г. Кувандык	7610	523	198.25	550	350			1931–2020
19159	р. Сакмара – с. Татарская Каргала	29600	343	86.97	870	860			1965–2020
19185	р. Салмыш – с. Буланово	2580	230	122.23	580	500			1943–2020
19190	р. Чёрная – с. Краснохолм	943	164	71.9	480				1949–2020
19197	р. Илек – с. Весёлый Первый	17200	297	123.9	400				1988–2020
19235	р. Чаган – с. Сергиевка	545	147	64.87	900	870			1969–2020

* В течение ≥ 10 сут.

по состоянию на 2022 г. и для низших уровней воды по состоянию на 2021 г.

Помимо приведенных в табл. 1, имелись отметки ОГЯ и НГЯ для высших уровней воды за период 2019–2022 гг. За этот период изменились лишь отметки НГЯ в 2020 г. для постов р. Урал – г. Верхнеуральск (с 230 см до 270 см) и р. Урал – с. Кизильское (450 см до 520 см).

Критерий ОГЯ для низких уровней установлен для поста р. Урал – г. Оренбург; причем приведены две отметки ОГЯ, при которых нарушается обеспечение населения водой вследствие оголения водозаборов: для летне-сезонных труб насосной станции (145 см) и для всасывающих труб насосной станции первого подъема (61 см). Вторая отметка будет считаться опасной, если уровни воды ниже отметки будут держаться ≥ 10 дней.

Критерий НГЯ для низких уровней (–5 см) установлен для поста р. Урал – г. Верхнеуральск. Падение уровня воды ниже этой критической отметки приводит к нарушению обеспечения на-

селения водой вследствие оголения водозаборов. По информации, полученной от Челябинского ЦГМС, при данной отметке не происходит полного прекращения подачи воды, однако возникают затруднения в ее подаче.

Для анализа и научного обобщения данных гидрологического мониторинга рек рассматриваемого бассейна в рамках НИР “Анализ современного состояния системы государственного мониторинга водных объектов в бассейне р. Урал, разработка базы гидрологических данных, расчет основных гидрологических характеристик водных объектов бассейна р. Урал по материалам наблюдений государственной наблюдательной сети Росгидромета и разработка рекомендаций по проведению мониторинга водных объектов для бассейна р. Урал” была подготовлена база данных многолетних гидрологических характеристик, содержащая сведения об уровнях воды и датах их установления за периоды наблюдения, приведенные в табл. 1: высшие срочные уровни воды в году и даты их наступления, ежедневные уровни воды за период наводнения, низшие срочные уровни воды для

зимнего периода и периода открытого русла и даты их наступления, ежедневные уровни воды за период маловодья.

Из дальнейшего анализа исключались отметки уровня воды за период до строительства крупных водохранилищ, плотин и прудов при обнаружении существенных отличий в водном режиме в сравнении с нынешними условиями.

Наводнения

Для анализа частоты возникновения ОГЯ и НГЯ проводилась оценка их повторяемости как частного от деления количества ОГЯ или НГЯ на количество лет наблюдений, умноженное на 100%.

Оценка опасности наводнений проводилась по методике, разработанной Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) и описанной в [2].

Согласно методике исследования опасности наводнения, в первую очередь определяется его причина. Наводнения подразделялись по генезису: обусловленные таянием снежного покрова, выпадением дождевых осадков либо образованием заторов или зажоров льда.

Оценка категории опасности наводнения проводилась в соответствии с принятыми показателями (табл. 2) [2].

Для расчета обеспеченности высшего уровня воды в период затопления предварительно выполнялся статистический анализ многолетних рядов высших уровней и анализ факторов хозяйственной деятельности с целью выявления возможного нарушения однородности и стационарности исходной уровневой информации. Устанавливался генезис формирования наводнений (половодье, паводок, затор или зажор). Уровень воды был классифицирован как заторный/зажорный при наличии отметки ледового явления для высшего уровня “затор/зажор ниже поста”.

Проверка однородности рядов данных проводилась на основе применения критериев Стьюдента (однородность по среднему) и Фишера (однородность по дисперсии). Также проводи-

лась проверка стационарности ряда по десяти критериям Диксона и двум критериям Смирнова–Граббса, учитывающим асимметрию и внутрирядную связанность (автокорреляцию) гидрологических рядов. Для однородных рядов высших уровней воды при определении их обеспеченности за период наводнения использовались аналитические функции распределения вероятности. При неоднородности рядов использовались составные кривые распределения.

Превышение высшего уровня воды над отметкой ОГЯ вычислялось по разнице высшего (срочного) уровня воды и критической отметки уровня.

Продолжительность затопления и максимальная скорость повышения уровня в период затопления определялись на основе анализа хода среднесуточных уровней воды.

В гидрологической практике принято оценивать показатели опасных наводнений (обеспеченность, превышение высшего уровня и пр.) по наибольшему в году паводку. В данной работе дополнительно оценено количество случаев, когда уровень воды превысил критическую отметку ОГЯ или НГЯ.

На основе вышеописанных категорий опасности по разным показателям выявлены гидрологические посты с наибольшей опасностью наводнений в нижеприведенной последовательности.

1. Для каждого наводнения на посту определялись показатели опасности наводнений (обеспеченность и превышение уровня воды, продолжительность и максимальная скорость повышения уровня воды).
2. Для каждого поста по всем наблюдаемым на нем наводнениям рассчитывались усредненные значения показателей опасности наводнений.
3. Для каждого усредненного показателя определялась категория опасности по табл. 2.
4. Каждой категории опасности присваивалось значение (табл. 2) в диапазоне от 0 до 4, где 0 — явления без категории опасности, 4 — чрез-

Таблица 2. Категории опасности наводнений и их показатели

Показатель опасных наводнений	Категории опасности (цифровое значение)			
	чрезвычайно опасные (4)	весьма опасные (3)	опасные (2)	умеренно опасные (1)
Обеспеченность высшего уровня воды в период затопления (P , %)	$P \leq 1$	$1 < P \leq 2$	$2 < P \leq 5$	$5 < P \leq 10$
Превышение высшего уровня воды над отметкой ОГЯ (H , м)	$H \geq 2$	$1 \leq H < 2$	$0.5 \leq H < 1$	$H < 0.5$
Продолжительность затопления (T , сут)	$T \geq 20$	$15 \leq T < 20$	$5 \leq T < 15$	$1 \leq T < 5$
Максимальная скорость повышения уровня в период затопления (V , м/сут)	$V \geq 2.5$	$1.5 \leq V < 2.5$	$1.0 \leq V < 1.5$	$V < 1.0$

Таблица 3. Категории опасности маловодий и их показатели

Показатель	Категории опасности			
	чрезвычайно опасные	весьма опасные	опасные	умеренно опасные
Обеспеченность низшего уровня воды в период маловодья (P , %)	$P \geq 99$	$98 \leq P < 99$	$95 \leq P < 98$	$90 \leq P < 95$
Продолжительность нахождения уровня ниже критической отметки (T , сут)		$T \geq 30$	$10 \leq T < 30$	$1 \leq T < 10$

вычайно опасные наводнения. Поскольку те или иные показатели опасности наводнения могут быть более или менее значимы с точки зрения вреда населению и объектам экономики, а с учетом особенностей водных объектов и прохождения самого ОГЯ степень этой значимости может варьировать, было принято решение присвоить одинаковые веса каждому из показателей опасности. С точки зрения авторов статьи, назначение весов для показателей опасности требует специальных исследований.

5. Рассчитывался обобщенный критерий опасности наводнений путем суммирования значений категорий опасности по каждому показателю. Значения обобщенного критерия опасности наводнений могут варьировать в диапазоне от 2 (умеренно опасное по показателю превышения уровня воды и максимальной скорости, не имеет категории опасности по остальным показателям) до 16 (чрезвычайно опасное по всем показателям).

Таким образом, получены обобщенные критерии опасности для гидрологических постов и для конкретных ОГЯ, наблюдавшихся на них.

Маловодья

Последовательность расчетов аналогична описанной ранее для высших уровней воды.

В результате выделяются годы с уровнем воды ниже критического. Для этих лет определяется обеспеченность низших наблюдаемых уровней и продолжительность нахождения уровня ниже критической отметки. Категория опасности ранее наблюдавшихся опасных маловодий определяется в зависимости от обеспеченности низшего уровня, а также от продолжительности нахождения уровня ниже критической отметки (табл. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка однородности рядов высших и низших уровней воды

Большинство рядов высших уровней воды оказались однородными по всем критериям. Исключение – пост р. Жарлы – пос. Адамовка, для которого отмечены нарушения однородности по критерию Стьюдента и общий тренд на увеличение высшего уровня воды. Для постов р. Илек – с. Веселый Первый и р. Черная – с. Краснохолм, напротив, тренд отрицательный и также отмечается неоднородность по критерию Стьюдента. Помимо этого, ряд для поста р. Черная – с. Краснохолм имеет неоднородность по критериям Диксона и Граббса. Ряд высших уровней воды для поста р. Сакмара – г. Кувандык имеет неоднородность по критерию Диксона. Ника-

ких заметных переломов в ходе высших уровней воды не было отмечено.

Ряды низших уровней воды по постам р. Урал – г. Верхнеуральск и р. Урал – г. Оренбург неоднородны по критериям Стьюдента и Фишера. Для поста в г. Верхнеуральске перелом в ходе низших уровней воды отмечен в 1975 г., для г. Оренбурга – в 1995 г., когда низшие уровни заметно уменьшились по сравнению с предыдущим периодом. Ряд низших уровней воды для поста в г. Оренбурге также имеет неоднородность по критерию Диксона.

Наводнения

За период с 1930 по 2020 г. на реках бассейна Урала зафиксировано 71 и 208 наводнений с превышением отметки ОГЯ и НГЯ соответственно (рис. 2). Абсолютное большинство (96%) всех наводнений приходится на половодье, остальные на дождевые паводки (1%) и заторные явления (3%).

При рассмотрении динамики многолетних изменений ОГЯ и НГЯ необходимо учитывать степень развития гидрологической сети, которая на рис. 2б представлена как “освещенность наблюдениями”. Здесь под освещенностью наблюдениями понимается суммарное количество случаев высших уровней воды, наблюдаемых на рассматриваемых постах, выраженное в процентах от максимальной освещенности наблюдениями за десятилетие, когда за каждый год для каждого рассматриваемого поста имеется отметка высшего уровня воды. Как следует из рис. 2, увеличение количества наводнений с превышением отметок ОГЯ и НГЯ произошло одновременно с открытием новых постов и налаживанием регулярных наблюдений на действующих постах.

Точно говорить об отсутствии или наличии в многолетней динамике количества ОГЯ и НГЯ значимых тенденций не представляется возможным, поскольку это зависит от освещенности наблюдениями в те или иные десятилетия. Вместе с тем установлено, что наибольшее количество ОГЯ в рассматриваемом регионе произошло в период 1990–1999 гг., НГЯ – 1980–1989 гг.

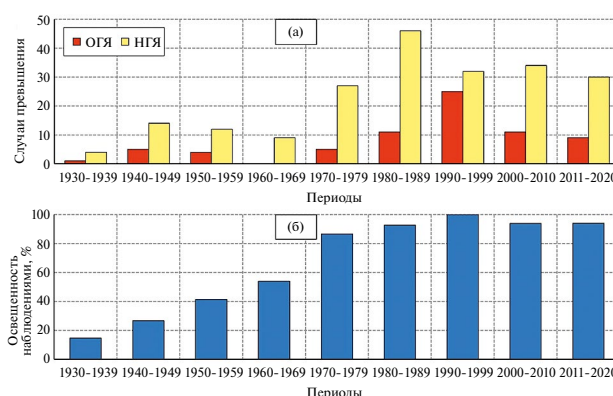


Рис. 2. Количество случаев превышения отметок ОГЯ и НГЯ на реках бассейна Урала (а); освещенность наблюдениями за высшими уровнями воды (б).

Большинство ОГЯ и НГЯ за рассматриваемый период зафиксировано в апреле – 66 ОГЯ и 181 НГЯ. В марте наблюдалось 1 ОГЯ и 11 НГЯ, в мае – 2 ОГЯ и 14 НГЯ. По одному ОГЯ и НГЯ отмечено в июне и августе.

Выполненные исследования позволили выделить гидрологические посты с наиболее высокой повторяемостью превышения отметок ОГЯ и НГЯ. Так, для постов р. Жарлы – пос. Адамовка, р. Суундук – пос. Майский, р. Чаган – с. Сергиевка и р. Орь – с. Ащебутак повторяемость лет с превышением отметки ОГЯ составляет от 11 до 25% (рис. 3а). Для более половины (7 из 15) постов повторяемость НГЯ > 20%. Обращает на себя внимание практически ежегодное превышение отметок НГЯ (рис. 3б) на постах р. Большой Кумак – пос. Новоорск, р. Сакмара – г. Кувандык и р. Урал – г. Орск.

По результатам анализа категорий опасности наводнений рассчитан обобщенный критерий опасности для разных постов (рис. 4), значения которого для российской части бассейна р. Урал варьируют от 3 до 8. По зафиксированным ОГЯ диапазон значений обобщенного критерия – от 2 до 11.

Наиболее опасные наводнения с обобщенным критерием 8 отмечались на посту р. Урал – с. Кизильское при повторяемости ОГЯ 5.7% (5 наводнений за 88 лет), причем самые опасные наводнения выявлены по максимальной скорости повышения уровня воды в период затопления.

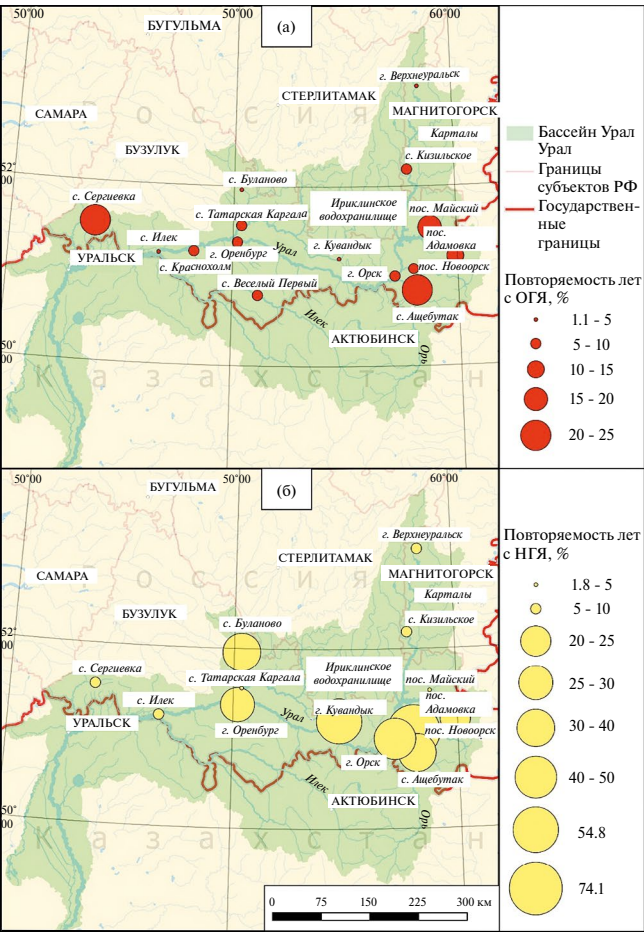


Рис. 3. Повторяемость лет (%), при которой был превышен критический уровень ОГЯ (а) и НГЯ (б) для гидрологических постов, расположенных на территории бассейна р. Урал в границах Российской Федерации.

Обобщенный критерий опасности наводнений на посту варьирует от 7 до 9. Самое опасное наводнение с показателем 9 наблюдалось в 1946 г., по показателю максимальной скорости повышения уровня воды (2.65 м/сут) оно было отнесено к чрезвычайно опасным. На данном посту фиксируется наибольшая продолжительность стояния уровня воды выше отметки ОГЯ — до 9 сут в 1947 г. Повышение уровня воды в период паводка послужило причиной наводнения на посту в 2013 г. Тогда уровень воды держался ≤ 2 сут. Причиной остальных наводнений было повышение уровня воды в весенний период.

Для постов р. Ор — с. Ащевутак и р. Жарлы — пос. Адамовка с повторяемостью ОГЯ 25% и 11%

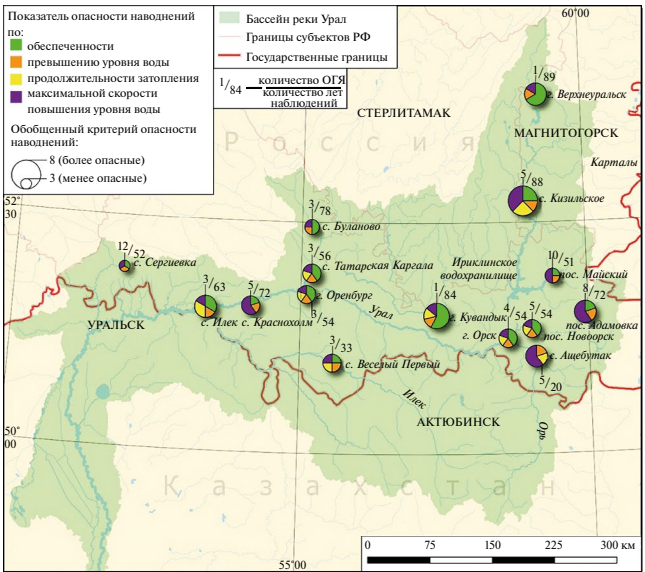


Рис. 4. Обобщенный критерий опасности наводнений и вклад в него разных показателей опасности наводнений для гидрологических постов, расположенных на территории бассейна р. Урал в границах Российской Федерации.

соответственно обобщенный критерий опасности равен 6. В 1998 г. на посту р. Ор — с. Ащевутак наблюдалось самое опасное наводнение в бассейне р. Урал с обобщенным критерием, равным 11, — чрезвычайно опасное по скорости повышения уровня воды (до 2.96 м/сут). 17.04.1998 в результате подъема уровня воды на реках Ори, Кудык, Сухая Губерля, Жари было затоплено 1100 жилых домов в 35 населенных пунктах, затоплено более 4530 га сельхозугодий, повреждено 2 плотины, 216 домов, 3 опоры ЛЭП, 53 км дорог [7]. Все наводнения на посту происходили за счет таяния снега весной.

На посту р. Жарлы — пос. Адамовка произошло 2 выдающихся по своим показателям наводнения. В 2002 г. наблюдалось наводнение с обобщенным критерием, равным 10, с наибольшей зафиксированной скоростью подъема уровня воды — до 3.67 м/сут. Наводнение 2005 г. с обобщенным показателем 8 стало наиболее значительным по превышению уровня воды над отметкой ОГЯ (до 1.5 м). В Адамовском районе было затоплено 300 жилых домов [11]. В 1985 г. на посту произошло наводнение, вызванное заторм, который наблюдался в течение 4 дней до его устранения техническими средствами. Для

остальных ОГЯ главная причина — таяние снега весной.

Повторяемость ОГЯ на посту р. Суундук — пос. Майский составляет 20% (10 наводнений за 51 год) при обобщенном критерии опасности наводнений, равном 4. На посту за период наблюдений фиксировались ОГЯ с обобщенным критерием от 2 до 8. В 1994 и 2000 гг. наблюдались весьма опасные наводнения по максимальной скорости повышения уровня воды за период затопления. Причина всех наводнений — таяние снега в весенний период.

Повторяемость ОГЯ в г. Орске составляет 7%, а обобщенный критерий опасности равен 5. Однако в связи с высокой плотностью населения и особенностями размещения населенных пунктов в пределах затопляемых участков, здесь регулярно фиксируются наиболее значительные последствия наводнений [10]. По данным [7], в период 1990–2015 гг. в г. Орске зафиксировано 6 чрезвычайных ситуаций, обусловленных наводнениями, причем наиболее значительное ОГЯ произошло в 2000 г. в связи с высоким половодьем и повышенным сбросом воды из Ириклинского водохранилища. В результате в г. Орске было затоплено 2444 жилых дома (7640 жителей), отселалось 1657 человек. Зафиксированное наводнение имело категорию “опасное” по обеспеченности наивысшего уровня воды и продолжительности затопления и “умеренно опасное” по превышению над критической отметкой и максимальной скорости повышения уровня воды.

Наиболее низкое значение обобщенного критерия опасности наводнений (3) отмечается для поста р. Чаган — с. Сергиевка с повторяемостью наводнений 23% (12 наводнений за 52 года). Только одно весьма опасное наводнение по обеспеченности в 2011 г. имеет обобщенный критерий, равный 8. Остальные варьируют от 2 до 5. Подавляющее большинство наводнений на посту не имеет категории опасности по продолжительности затопления, по остальным показателям это чаще всего умеренно опасные наводнения. Все наводнения на посту происходили по причине повышения уровня воды в период весеннего половодья.

Среднесуточные уровни воды лишь однажды превысили отметку ОГЯ два раза за год на посту р. Суундук — пос. Майский в 1994 г. Продолжительность второго подъема составила ≤ 1 сут и зафиксирована сразу после первого подъема в период весеннего половодья. Для остальных 70 ОГЯ, зафиксированных в бассейне р. Урал, превышение критической отметки происходило один раз за соответствующий год.

Среднесуточные уровни воды превышали критическую отметку НГЯ несколько (2–4) раз за год в 27 из 208 случаев неблагоприятных явлений; причем чаще всего это наблюдалось на гидрологических постах (пос. Новоорск, г. Кувандык, г. Орск), где обнаружена наибольшая повторяемость НГЯ. Наибольшее количество таких случаев (12 из 27 НГЯ) отмечается для поста р. Урал — г. Орск, где среднесуточные уровни воды могли превышать критическую отметку от 2 до 4 раз за год. Также на данном посту отмечается наибольшая продолжительность стояния уровня воды выше отметки НГЯ. Если средняя продолжительность стояния уровня воды выше отметки НГЯ для наибольшего в году паводка составляет 23 дня, то при расчете общей продолжительности затопления за год она увеличивается до 36 дней.

Маловодья

Для поста р. Урал — г. Верхнеуральск за весь рассматриваемый многолетний период уровни ниже отметки НГЯ были зафиксированы 4 раза (рис. 5). Обеспеченность уровня НГЯ составила 94.3%.

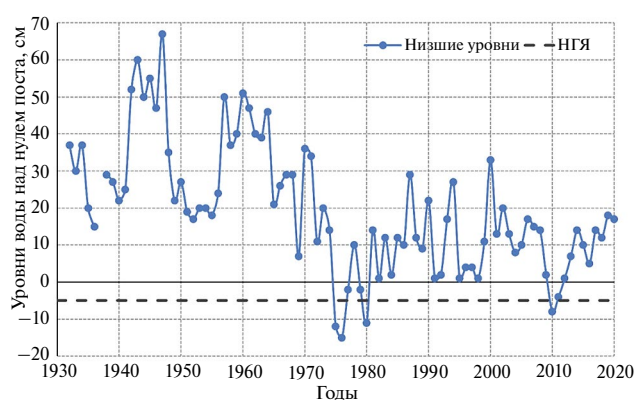


Рис. 5. Низшие уровни воды на гидрологическом посту р. Урал — г. Верхнеуральск.

По показателю обеспеченности отмечались чрезвычайно опасное, весьма опасное и два опасных маловодья в 1976, 1975, 1980 и 2010 гг. соответственно.

Уровень воды ниже критической отметки держался 75 сут в период зимней межени 1976 г. За период открытого русла 1975 г. уровень воды опускался ниже отметки НГЯ 2 раза: на 53 сут, когда наблюдался низший уровень воды за год, затем еще на 7 сут. Зимой 1980 г. уровень воды был ниже отметки 32 сут. Маловодья за эти 3 года можно отнести к весьма опасным по продолжительности нахождения уровня воды ниже критической отметки. В 2010 г. наименьший уровень воды зафиксирован в период открытого русла. Среднесуточные уровни воды не падали ниже критической отметки; следовательно, низший уровень держался <1 сут. Таким образом, в 2010 г. наблюдалось маловодье без категории опасности по продолжительности.

За период после начала нормальной эксплуатации Ириклинского водохранилища на р. Урал — г. Оренбург уровни воды ниже отметок ОГЯ не наблюдались. Обеспеченность уровней ОГЯ (145 см и 61 см) составила >99%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что как минимум для четырех постов (р. Орь — с. Ащевутак, р. Чаган — с. Сергиевка, р. Суундук — пос. Майский, р. Жарлы — пос. Адамовка) повторяемость ОГЯ > 10%, тогда как в соответствии с действующими правилами, регулирующими в том числе требования по установлению критерия опасного явления, повторяемость ОГЯ не должна быть > 10% (1 раз в 10 лет) [8]. Это указывает на расположение хозяйственных объектов на систематически затопляемых участках пойм рек. В подавляющем большинстве случаев на данных постах превышение отметки ОГЯ происходило один раз за конкретный год в период весеннего половодья.

Следует отметить высокую повторяемость НГЯ в результате повышения уровня воды на некоторых гидрологических постах. Так, для постов р. Урал — г. Орск (54 года наблюдений)

и р. Сакмара — г. Кувандык (84 года наблюдений) в 50 и 55% общего числа лет наблюдений отмечается превышение отметок НГЯ. А для поста р. Большой Кумак — пос. Новоорск (54 года наблюдений) превышение отметок НГЯ происходит в 74% от общего числа лет. Для этих постов может наблюдаться многократное (до четырех раз за год) превышение отметки НГЯ в разные фазы водного режима (половодье и паводки). Такая ситуация говорит о продолжающемся освоении и застройке пойм, что при высоких весенних половодьях и дождевых паводках создает дополнительные риски экономического ущерба и, кроме того, может ограничивать возможности регулирования попусков воды из водохранилищ в нижние бьефы гидроузлов.

Для постов с высокой повторяемостью ОГЯ и НГЯ целесообразно проведение пересмотра установленных в настоящее время критических отметок уровня воды, при достижении которых фиксируется ОГЯ или НГЯ. Результатом должно стать официальное обращение к местным органам государственной власти, физическим и юридическим лицам, в ведении которых находятся прибрежные территории и расположенные на них объекты, наиболее уязвимые к негативным воздействиям вод по повторяемости, продолжительности и глубине затопления в период прохождения половодий и паводков. На основе объективной информации о характеристиках опасных наводнений для конкретных участков водных объектов должны проводиться мероприятия по предотвращению их негативных последствий. К числу таких мероприятий относятся инженерная защита территорий, расчистка и спрямление русел рек, отселение населения из затопляемых территорий, повышение отметок территорий путем подсыпки [11].

Выбор конкретного подхода к сокращению ущерба, вызванного наводнениями в данном бассейне, должно быть основано исключительно на экономических расчетах. При этом важно учитывать потенциальные социальные и экологические последствия таких решений [11]. Соответственно, после проведения того или иного мероприятия по предотвращению негативного воздействия вод критические отметки уровня воды должны пересматриваться.

Так, с учетом изменения отметок НГЯ за период 2019–2022 гг. можно предположить, что действия по предотвращению негативного воздействия вод предпринимались для территорий вблизи постов на р. Урал у г. Верхнеуральска и с. Кизильского. Для г. Верхнеуральска при критической отметке 230 см в 2019 г. повторяемость НГЯ составляла бы 26%, тогда как при нынешней отметке 270 см она составляет 9%. Для с. Кизильского по отметке 450 см в 2019 г. повторяемость НГЯ была бы равна 15%, при нынешней отметке 520 см – 7%.

Особое внимание следует обратить на гидрологические посты (р. Орь – с. Ащебутак и р. Жарлы – пос. Адамовка) с высокой повторяемостью ОГЯ и наибольшей степенью опасности наводнений по разным показателям. Так, 3 из 5 произошедших за 20 лет наводнений на р. Ори имеют категории чрезвычайно опасные и весьма опасные по максимальной скорости повышения уровня воды за период затопления. На р. Жарлы – пос. Адамовка наблюдалось 2 рекордных наводнения по превышению уровня воды над отметкой ОГЯ и максимальной скорости повышения уровня воды за период затопления.

Таким образом, необходимо предпринять меры для снижения негативных последствий наводнений, в первую очередь для территорий, где зафиксированы наиболее опасные наводнения по совокупности показателей.

Для маловодий характерна иная ситуация. Отметки ОГЯ и НГЯ установлены только для двух постов. На р. Урал у г. Оренбурга низшие уровни воды ни разу не падали ниже отметки ОГЯ за период наблюдений после начала нормальной эксплуатации Ириклинского водохранилища в 1967 г. и не препятствовали работе водозабора.

На р. Урал у г. Верхнеуральска повторяемость НГЯ составила 4.5%. Падение уровня воды ниже отметок НГЯ началось после 1975 г. С этого года наблюдается перелом в ходе низших уровней воды. Так, уровни воды за период 1975–2020 гг. в среднем на 74% ниже, чем за предыдущий период (1932–1974 гг.). В 76% случаев низшие уровни воды на посту отмечены в период открытого русла, причем это соотношение не изменилось

после 1975 г. Причиной перелома в ходе низших уровней воды может быть начавшаяся с 1970-х гг. фаза пониженной водности для стока летне-осенней межени на посту [3]. Согласно [5], в будущем повторяемость маловодных лет может увеличиться, а к середине XXI в. ожидается общее климатически обусловленное сокращение стока рек на 10–20% (на 20–30% при наихудшем сценарии), что может увеличить повторяемость НГЯ и затруднить водоснабжение населения водой.

ВЫВОДЫ

На реках российской части бассейна Урала подавляющее большинство (96%) ОГЯ и НГЯ приходится на наводнения, вызванные таянием снега в период весеннего половодья. За период 1970–2020 гг. однозначного тренда на изменение количества ОГЯ и НГЯ не было установлено.

Выявлены пункты, вблизи которых отмечена высокая повторяемость ОГЯ и НГЯ, а также пункты, на которых наблюдаются наиболее опасные наводнения по совокупности показателей. Так, для четырех гидрологических постов на реках Ори, Суундук, Жарлы и Чаган установлена высокая повторяемость ОГЯ (>10%), что указывает на наличие хозяйственных объектов на систематически затопляемых участках поймы рек. Из них наиболее опасные наводнения отмечены на реках Ори и Жарлы. Высокая повторяемость НГЯ (>50%) зафиксирована для пунктов пос. Новоорск, г. Орск и г. Кувандыка. Для этих постов также отмечалось многократное превышение отметки НГЯ в разные фазы водного режима (половодье и паводки) в течение года.

Для перечисленных выше постов целесообразны меры по снижению негативного воздействия вод и дальнейший пересмотр критических отметок.

Критические отметки низших уровней воды установлены для двух пунктов на р. Урал – г. Оренбург и г. Верхнеуральск. В г. Оренбурге низший уровень воды ни разу не падал ниже отметки ОГЯ за период наблюдения после начала нормальной эксплуатации Ириклинского водохранилища в 1967 г. В г. Верхнеуральске зафик-

сированы существенные изменения в ходе низших уровней воды после 1975 г. — уровень воды в этот период падал ниже отметки НГЯ 4 раза.

Поскольку бассейн р. Урал — трансграничный, для полноты исследования целесообразно его продолжение в тесном взаимодействии специалистов Российской Федерации и Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Шаймарданов М.З. Влияние опасных гидрометеорологических явлений на устойчивое развитие экономики России // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 59–67.
2. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Оценка характеристик наводнений на реках Северо-Западного федерального округа за период 1950—2019 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. № 3. С. 57–65.
3. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Молчанова Т.Г. Многолетние изменения стока рек бассейна Урала и их причины // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана. Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием, Сочи. Новочеркасск: Лик, 2021. С. 87–92.
4. ГОСТ Р 22.0.03-2022 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2023. № 80-ст.
5. Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова Г.С. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вест. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2018. № 1. С. 90–101.
6. Прохорова Н.Б., Косолапов А.Е. Современный водохозяйственный баланс реки Урал на территории Российской Федерации // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 2. С. 4–20.
7. Разумов В.В., Качанов С.А., Разумова Н.В. Масштабы и опасность наводнений в регионах России. М.: ВНИИ ГОЧС, 2018. 363 с.
8. РД 52.04.563-2013 Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. СПб.: Типография “Моби Дик”, 2013. 53 с.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеиздат, 1970.
10. Сивохин Ж.Т., Падалко Ю.А. Географо-гидрологические факторы опасных гидрологических явлений в бассейне реки Урал // Изв. РАН. Сер. географическая. 2015. № 6. С. 53–61.
11. СКИОВО бассейна реки Урал (российская часть). Кн. 3. Целевые показатели. Волгоград: Нижне-Волжское БВУ Федерального агентства водных ресурсов, 2014. № 65. 67 с.
12. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Экстремальные гидрологические ситуации. М.: Медиа-ПРЕСС, 2010. 460 с.
13. Шамин С.И., Санина А.Т. Основные тенденции изменения частоты появления опасных гидрометеорологических явлений на территории Российской Федерации // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2018. № 183. С. 42–50.
14. Copernicus Global Digital Elevation Model. Distributed by OpenTopography. European Space Agency. Sinergise. 2021. [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.5069/G9028PQV> (дата обращения: 25.03.2024)

HAZARDOUS AND ADVERSE HYDROLOGICAL PHENOMENA FOR THE RUSSIAN PART OF THE URAL RIVER BASIN

L. S. Kurochkina*, E. N. Greka, T. V. Skorospekhova, S. S. Chepikova

*Federal state budgetary institution "State Hydrological Institute", St. Petersburg,
199004 Russian Federation*

**e-mail: kurochkina_liubov@hydrology.ru*

Hazardous and adverse hydrological phenomena in rivers of the Russian part of the Ural River basin have been analyzed and assessed based on data of long-term observations of the level regime at hydrological gages with established critical water levels. A procedure developed in the State Hydrological Institute was used, and a generalized criterion was proposed, which enabled identifying gages with the largest flood hazard. The analysis has shown that the recurrence of hazardous hydrological phenomena at gages located at Ashcherbutak, Sergievka, Maiskii, and Adamovka settlements is $>10\%$, with most hazardous floods observed at the Ashchebutak and Adamovka settlements. The recurrence of unfavorable hydrological phenomena at gages at the towns of Orsk and Kuvandyk and at Novoorsk Settlement is $>50\%$. At the same gages, the mark was exceeded many times (up to four times per year) in different phases of water regime (spring flood and freshets). This indicates the need to take measures to prevent the adverse effect of water in areas subject to a high risk of inundation. Critical marks of low water level were recorded at two sites on the Ural River – the City of Orenburg and the Town of Verkhneuralsk. The lowest water level at Orenburg gage has never dropped below the level of a hazardous hydrological phenomenon. At the gage of Verkhneuralsk Town, against the background of considerable changes in the lowest water levels after 1975, its level dropped 4 times below the mark of unfavorable hydrological phenomenon.

Keywords: critical marks of water level, Ural River basin, recurrence, hazard categories, exceedance, floods, low-water periods.

ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОТЯЖЕННОГО УЧАСТКА р. УРАЛ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ЗАТОПЛЕНИЯ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НАВОДНЕНИЯМИ И ВОЛНАМИ ПРОРЫВА¹

© 2024 г. В. В. Беликов^{a, *}, Н. М. Борисова^a, Е. С. Васильева^{a, **},
А. В. Глотко^{a, b}, Т. А. Фёдорова^a

^a Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^b Национальный исследовательский Московский Государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
Москва, 129337 Россия

*e-mail: belvv@bk.ru

**e-mail: vasilevae@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Построена численная гидродинамическая модель участка р. Урал от Ириклинского водохранилища (включая последнее) до створа в 30 км ниже впадения р. Сакмары; таким образом, общая протяженность модели составила >700 км. Для уменьшения времени разработки модели и ускорения калибровочных и вариантных расчетов участок разбит на 3 последовательных по длине русла части, стыковка между ними происходит посредством задания согласованных граничных условий. Моделирование выполняется на основе отечественного высокоточного программного комплекса STREAM 2D CUDA с учетом резких перепадов отметок дна и многофракционного состава грунта. Проведена калибровка модели на постоянные расходы воды. Выполнены расчеты половодья обеспеченностью 1% и волны прорыва Ириклинского гидроузла при двух сценариях. Получены максимальные уровни воды, глубины и зоны затопления. Выявлен эффект многократного увеличения крутизны переднего фронта паводковой волны на протяжении рассматриваемой области.

Ключевые слова: половодье, волна прорыва, численное гидродинамическое моделирование, развитие прорыва, гидрограф излива, глубины и зоны затопления.

DOI: 10.31857/S0321059624050063 EDN: VXRZKQ

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении работ в рамках Государственного контракта, посвященному сохранению и восстановлению трансграничной р. Урал (Жайык)¹, головным исполнителем по которой был назначен Институт водных проблем РАН, много внимания было уделено разработке численных гидродинамических моделей протяженных участков р. Урал. Изучены возможные изменения участков речного русла в нижних бьефах

водохранилищ и других критических участков, для которых существуют риски наводнений, экономического ущерба, эрозии дна или берегов при следующих сценариях:

гидродинамическая авария земляной плотины Верхнеуральского гидроузла на р. Урал, распространение волны прорыва, возникновение каскадной гидродинамической аварии с прорывом Магнитогорского гидроузла и формирования зон катастрофического затопления г. Магнитогорска (результаты опубликованы в [11]); длина участка моделирования 70 км; разрушаются 8 мостовых переходов;

распространение течений на участке среднего Урала от Ириклинского водохранилища до

¹ Работа выполнена в рамках Государственного контракта “Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной р. Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)”.

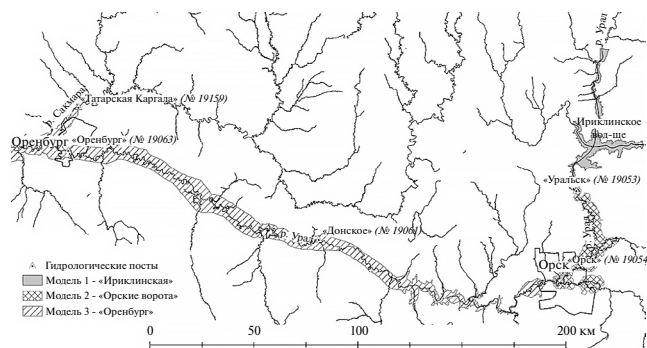


Рис. 1. Расположение участков гидродинамических моделей в долине р. Урал.

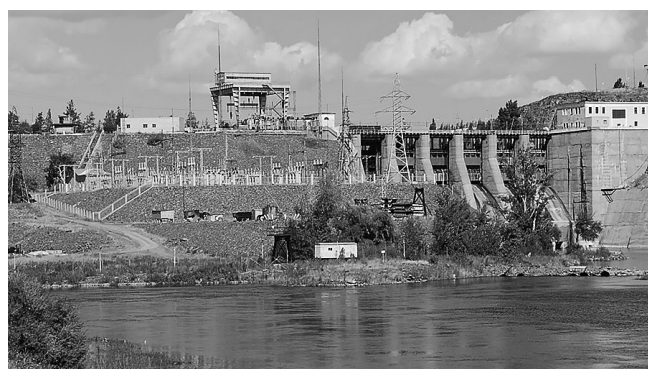


Рис. 2. Вид на Ириклинский гидроузел со стороны нижнего бьефа.

г. Оренбурга при разных режимах сброса с Ириклинской ГЭС (с учетом регулирования стока), половодья обеспеченностью 1% и волны прорыва при гидродинамической аварии на Ириклинской ГЭС;

русловые процессы и прорыв излучины на трансграничном участке р. Урал у с. Облавка с учетом гидрографов половодья и неоднородного состава грунта.

Статья посвящена описанию модели участка среднего Урала и некоторых результатов расчетов. Ознакомиться с подробным описанием методики численного моделирования протяженных участков рек и волн прорыва можно в [4–7].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок моделирования расположен в среднем течении р. Урал и включает в себя Ириклинское водохранилище и область от нижнего бьефа Ириклинского гидроузла до с. Шуваловского

(50 км ниже г. Оренбурга). Общая протяженность участка моделирования по руслу р. Урал (включая Ириклинское водохранилище) составляет >700 км (рис. 1).

Водный режим р. Урал и его притоков на участке моделирования относится к Казахскому типу, характеризующемуся высоким весенним половодьем и устойчивой меженью в остальное время года. Гидрограф – сезонный с пиком в весенний период.

Ириклинский гидроузел

Ириклинское водохранилище комплексного назначения расположено на территории Гайского района Оренбургской области, створ плотины находится в 83 км выше по реке от г. Орска и в 1810 км от устья реки, площадь водосбора в створе плотины – 36900 км² (рис. 2).

В состав ГТС Ириклинской ГЭС входят: каменно-набросная плотина, бетонная водосливная плотина со встроенным зданием ГЭС, буферная плотина, которая расположена ниже по течению и предназначена для поддержания определенного уровня воды в нижнем бьефе Ириклинской ГЭС, необходимого для оптимальной работы турбин.

Сооружения на пойме городов Орска и Оренбурга

В область моделирования попали два крупных города – Орск и Оренбург, здесь был выделен ряд сооружений, оказывающих влияние на поток воды.

В частности, в г. Орске имеются поперечные, сужающие поток, насыпи автомобильных и железнодорожных мостов, а также продольные насыпи дамб обвалования на правобережной и левобережной поймах в черте города. Железнодорожные мосты и автомобильный мост (который называют “большой” или “верхний”) не затопляются в период половодья, а “нижний” автомобильный мост периодически затопляется.

Оренбург расположен в месте впадения в р. Урал правобережного притока – р. Сакмары.

Центральная часть города находится на правом берегу р. Урал. Берег высокий, оползневой. В черте города выполнены берегоукрепления правого берега в виде набережной с пляжами и парковой зоной (рис. 3). На входе в город урезная линия низкой поймы, на которой расположен парк, закреплена габионами. На данном участке расположены два моста: пешеходный мост Европа—Азия и автомобильный мост. В 620 м ниже по течению от автомобильного моста находится железнодорожный мост. По пойме дороги идут в насыпи на незатопляемых отметках. Оба моста наглухо перекрывают пойму реки, оставляя для воды минимальный проем шириной 330 м.

В границах модели на р. Сакмаре учтены три моста. Ближайший к устью (в 7.35 км) расположен автомобильный мост. Насыпь этой дороги подходит вплотную к берегам, оставляя поперечное сечение в русле шириной 180 м. Расположенная выше по течению трасса железной дороги перекрывает пойму насыпью, оставляя проем в 270 м. Выше по течению, в 7.5 км от железнодорожного моста, располагается автомобильный мост. Здесь находится входная граница модели по р. Сакмаре.

Все перечисленные искусственные сооружения учтены при разработке описываемых ниже численных гидродинамических моделей.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Задачи исследований следующие:

— сбор и обработка исходных данных для моделирования: по подпорным сооружениям Ириклинского гидроузла, крупномасштабных топографических планов в границах катастрофического затопления в пределах расчетных участ-



Рис. 3. Набережная и пляж г. Оренбурга.

ков в масштабе $M 1 : 100000$ и иных топографических материалов из открытых источников, гидрологических данных наблюдений с гидрологических постов на реках Урал и Сакмаре, попадающих в расчетную область (“Уральск”, “Орск”, “Донское”, “Оренбург” и “Татарская Каргала”), космических снимков высокого разрешения на расчетную область из открытых источников;

— разработка двумерных компьютерных гидродинамических моделей расчетного участка р. Урал в нижнем бьефе Ириклинской ГЭС, включая г. Оренбург;

— валидация и калибровка моделей при пропуске разных расходов воды;

— выполнение систематических расчетов для условий различных пусков с Ириклинского гидроузла, волны половодья обеспеченностью 1%, волны прорыва при гидродинамической аварии Ириклинской плотины.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнялась с использованием отечественного программного комплекса STREAM 2D, основанного на оригинальном численном алгоритме решения двумерных уравнений мелкой воды на неровном дне. Первые версии алгоритма и программы были реализованы еще в 1985 г. [9] и с тех пор постоянно совершенствовались [10, 8]. В последней версии этого программного комплекса STREAM 2D CUDA [2], зарегистрированной в Роспатенте, реализован описанный в [1, 16, 17] новый алгоритм, обеспечивающий единственность и высокую точность решения уравнений мелкой воды на участках со сложным рельефом дна и гидротехническими сооружениями и распараллеленный на графическом процессоре NVIDIA с использованием технологии CUDA для ускорения расчетов. Алгоритм, валидация численной модели и многочисленные примеры приложения к различным задачам речной гидравлики и гидродинамики представлены также в монографиях [4, 6, 7].

Программа предназначена для расчета нестационарных и неравномерных течений при сложном рельефе дна, к которым относятся по-

ловодья и паводки в реках, речных долинах и водохранилищах, волны прорыва, вызванные разрушением напорного фронта плотин, и т. п. Расчет прорана в теле земляной плотины Ириклинского водохранилища выполнен с применением физико-математической модели развития проранов в грунтовых плотинах, входящей в состав программы STREAM 2D CUDA. Модель основана на гидроморфологическом методе численного моделирования развития прорана в плотинах, сложенных неоднородным грунтом. Описание, обоснование, верификация и примеры применения описаны в [7].

ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. УРАЛ

Разработаны 3 численные гидродинамические модели участков р. Урал, взаимно дополняющие друг друга (рис. 1):

Модель 1 — “Ириклинская” — включает в себя Ириклинское водохранилище, сооружения Ириклинского гидроузла и участок русла и поймы р. Урал до буферной плотины. Общая протяженность — 79 км.

Модель 2 — “Орские ворота” — построена на участок от Ириклинского гидроузла до Орских ворот в г. Орске. Кроме р. Урал, в модель включен участок 25 км р. Ори в границах г. Орска. Общая протяженность модели 2 по руслу р. Урал составила 115 км.

Модель 3 — “Оренбург” — построена на участок от Орских ворот до с. Шуваловского (50 км ниже г. Оренбурга), включает сам город и участок 33 км р. Сакмары. Общая протяженность по руслу р. Урал — 515 км.

Модели построены в границах предполагаемого затопления для наиболее тяжелого сценария прорыва Ириклинской плотины. Разбиение на 3 участка позволило распараллелить работу между разными группами исследователей (для сокращения общего времени разработки), в значительной степени независимо выполнить калибровку, верификацию и ряд вариантных расчетов по каждой модели.

Модель 1 использовалась для моделирования сценариев гидродинамической аварии на Ириклинском гидроузле. Условие на выходной границе модели 1 задавалось из расчетов, выполненных на модели 2. На моделях 2 и 3 выполнялись все сценарные расчеты, включая волну прорыва, затопление от половодья расчетной обеспеченностью 1% и попусков с Ириклинской ГЭС.

Построение цифровой модели рельефа

Цифровая модель рельефа (ЦМР) создавалась на основе единой триангуляционной поверхности (TIN). Построение и корректировка TIN выполнялась с помощью редактора триангуляционной поверхности средствами ArcGIS. Общая протяженность ЦМР составила ~1000 км, площадь 690 тыс. га. Единая TIN образована треугольниками в количестве 19.8 млн шт.

Рельеф поймы сформирован на основе геостра разрешением 30×30 м, полученного с [12]. На пойме восстановлены относительно схематизации математической модели защитные дамбы и насыпи под автомобильные и железные дороги. Отметки гребня насыпей получены на основе ЦМР Google Earth и имеют погрешности по высоте, соответствующие точности построения рельефа в диапазоне масштаба 1 : 50000 и 1 : 100000.

Рельеф русла р. Урал частично получен в результате инженерно-гидрографических работ, выполненных в 2023 г. На остальных участках, для которых не требовалась детализация, рельеф дна русла трапецеидального профиля из условия глубины от уреза в меженных условиях: от Ириклинского гидроузла до г. Орска — 3 м, в г. Орске — 1.5–2.0 м, на участке от г. Орска до г. Оренбурга — 1.5 м, ниже г. Оренбурга — 1 м. Глубины откорректированы в процессе верификации гидродинамической модели, уклон определен по урезам с топокарт М 1 : 100 000. Сооружения Ириклинского гидроузла и буферной плотины восстановлены с чертежей сооружений. Рельеф Ириклинского водохранилища откорректирован относительно кривой объемов и уровней. Детальная ЦМР от Ириклинского водохранилища до г. Орска приведена на рис. 4, в районе г. Оренбурга — на рис. 5.

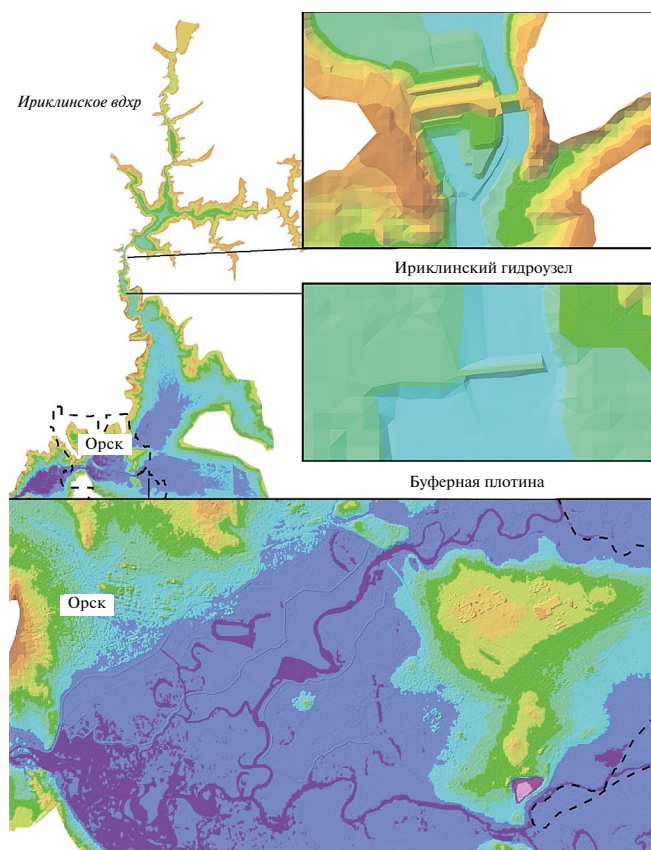


Рис. 4. ЦМР расчетного участка для моделей 1 и 2.

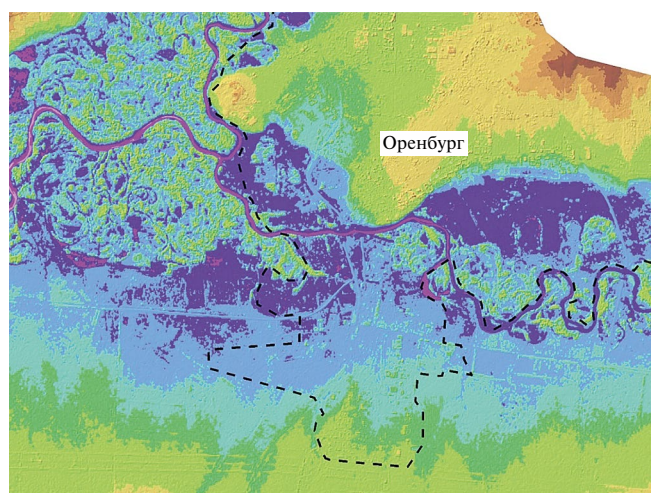


Рис. 5. ЦМР в районе г. Оренбурга, модель 3.

Построение расчетной адаптивной сетки

Расчетная сетка моделей — гибридная треугольно-четырёхугольная нерегулярной структуры. Для ее построения использовалась программа

“TRIANA” [3], адаптированная к современным компьютерам.

Русла рек Урал, Ори и Сакмары покрывались четырёхугольными ячейками с длинами сторон 10–20 м поперек русла и 20–45 м вдоль. На пойме строилась треугольная сетка с длинами сторон от 20 до 200 м. На сооружениях Иртишского гидроузла строилась преимущественно четырёхугольная сетка с размером ячеек 4×8 м.

Итоговая расчетная сетка модели 1 содержит 51 095 ячеек, для модели 2 — 194 387 ячеек, для модели 3 — 582 040 ячеек, фрагмент сетки представлен на рис. 6.

На модели 1 задавалось 8 границ: три входные границы по р. Урал и крупным притокам к Иртишскому водохранилищу, на которых задавался постоянный расход воды или гидрограф; одна выходная граница (в 320 м ниже буферной плотины), на которой задавалась зависимость $Q(Z)$, полученная в ходе калибровочных расчетов на модели 2; две внутренние границы в створе прорана и буферной плотины, а также две границы на водосбросной плотине Иртишского гидроузла, соответствующие верхнему и нижнему бьефам, здесь задавалось условие водослива.

На модели 2 задавалось 7 границ: две входные по р. Урал в створе Иртишского гидроузла и по притоку р. Ори, на которых задавались постоянные расходы или гидрографы по разным сценариям; одна выходная граница в 3 км ниже Орских

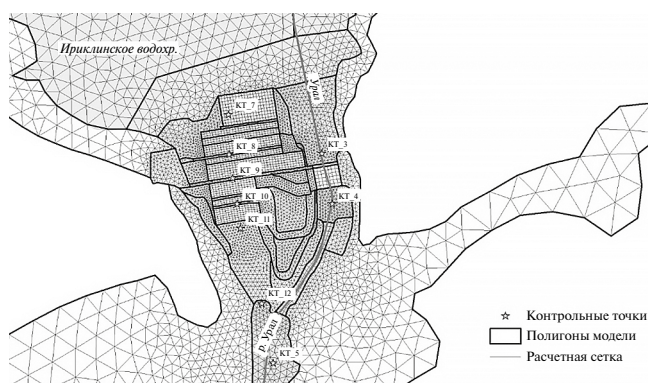


Рис. 6. Фрагмент расчетной сетки и контрольные точки модели 1, схематизация Иртишского гидроузла.

ворот, на которой задавалась $Q(Z)$, полученная путем последовательного подбора уровня воды при постоянном расходе; четыре внутренние границы в створе буферной плотины, по а/д мосту у с. Колпакского, ж/д мосту г. Орска и Орских ворот.

На модели 3 задавались две входные границы: по р. Урал в Орских воротах и по р. Сакмаре на гидропосту (гп) Татарская Каргала. На выходной границе модели задавалась зависимость расхода воды от уровней, полученная по морфологическому профилю долины реки.

Назначение коэффициентов шероховатости

При зонировании расчетной области по коэффициентам шероховатости (n) выделялись русловые участки, участки поймы, дамбы и дороги.

Для русла р. Урал и притоков Ори, Сакмары $n = 0.025$, для грунтовых насыпей дорог, на островах и полях с умеренной растительностью $n = 0.03$, на заросших островах и участках поймы $n = 0.045$. В результате калибровочных расчетов значения коэффициентов шероховатости в формуле Маннинга уточнялись.

ВАЛИДАЦИЯ И КАЛИБРОВКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Валидация численных моделей

Валидация численных моделей заключалась в подборе емкости Ириклинского водохранилища из условия соблюдения объемов воды при заданных уровнях с зависимостью $W(Z)$ из ПИВР [14].

Сопоставление зависимостей объемов Ириклинского водохранилища от уровня воды из ПИВР и полученной на численной модели приведено на рис. 7, причем небольшое расхождение начинается уже при превышении НПУ водохранилища.

Калибровка моделей

Калибровка моделей выполнялась на основе имеющейся гидрологической информации по фактическим уровням воды на гидропостах “Уральск”, “Орск”, “Донское” и “Оренбург” за период 1931–

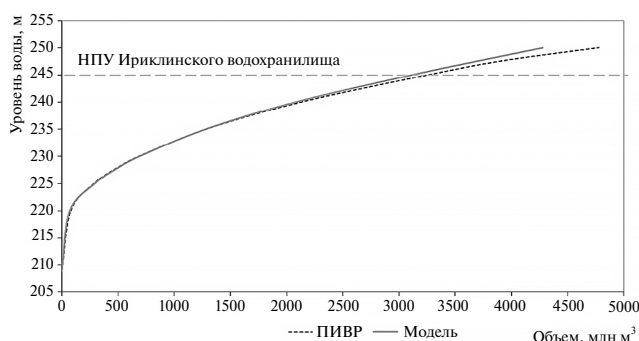


Рис. 7. Сопоставление зависимостей объемов Ириклинского водохранилища от уровня воды из ПИВР и полученной на численной модели.

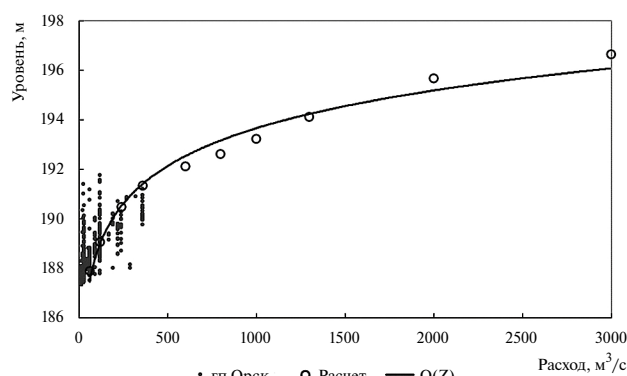


Рис. 8. Результаты калибровки модели 2 на гидропосту “Орск”.

2020 гг., а также из журналов суточных сбросов с Ириклинской ГЭС за период 2000–2021 гг. На модели 2 запускалась серия расчетов на сброс с Ириклинской ГЭС расходов воды в диапазоне от 60 до 3 000 м³/с. Проводился подбор шероховатости русла и поймы р. Урал, выходного граничного условия, корректировка высотной привязки отметок русла и поймы расчетного участка.

Процесс калибровки был осложнен недостаточностью данных по рельефу и разрозненностью гидрологических наблюдений на гидропостах. Коэффициенты шероховатости в русле варьировали от 0.022 до 0.027, на пойме – 0.04 для участков полей, 0.045 для заросших участков и 0.06 для участков с высокой растительностью и застройкой. В результате калибровки модели 2 построена $Q(Z)$, представленная на рис. 8.

В результате калибровки модели “Оренбург” построена $Q(Z)$, представленная на рис. 9. На

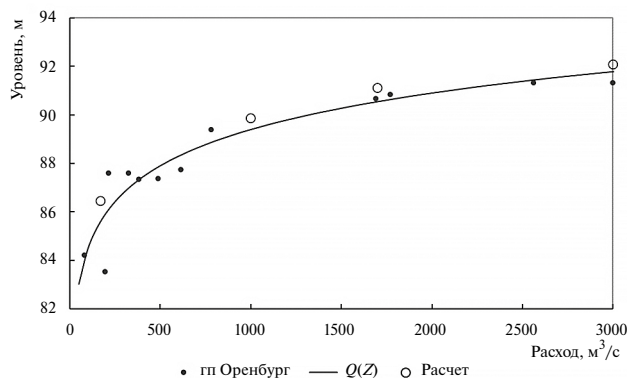


Рис. 9. Результаты калибровки модели 3 на гидропосту “Оренбург”.

модели 3 запускалась серия расчетов на расходы воды 170, 1000, 1700 и 3000 м³/с по р. Урал и 30 м³/с по р. Сакмаре, при этом на выходной границе модели задавалась $Q(Z)$, полученная по натурным данным. После установления постоянного расхода воды на всей численной модели уровень воды, полученный в процессе расчета на гидропостах “Оренбург” и “Донское”, сравнивался с фактическим уровнем при этом расходе, и уже в зависимости от этого корректировались значения коэффициентов шероховатости модели, после чего расчет повторялся. Таким образом, были подобраны следующие коэффициенты шероховатости: по руслу – 0.018, по пойме – 0.04, по дорогам и насыпям – 0.035.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ПОВОДОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ 1% НА УЧАСТКЕ р. УРАЛ ОТ ИРИКЛИНСКОГО ГИДРОУЗЛА ДО г. ОРЕНБУРГА

В проекте ПИВР [15] представлен расчетный гидрограф 1% паводка для створа Ириклинской ГЭС, который задавался на входной границе модели “Орские ворота”, и выполнялся расчет продолжительностью 30 сут. По результатам расчета была получена трансформация гидрографа в створе Орских ворот, который одновременно является входной границей модели “Оренбург”. Далее измененный гидрограф задавался на модели “Оренбург” и выполнялся расчет так же на 30 сут.

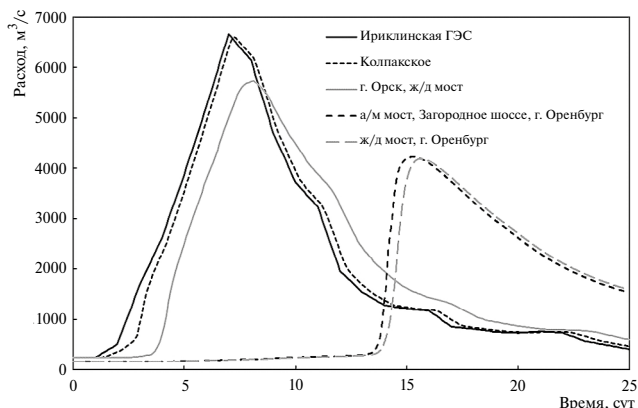


Рис. 10. Трансформация гидрографа паводка расчетной обеспеченностью 1% по длине расчетного участка.

Трансформация гидрографа расхода паводка 1%-й обеспеченности приведена на графике рис. 10. На входе в модель максимальный расход – 6660 м³/с на 7-е сут, в створе ж/д моста г. Орск – 5730 м³/с на 8.1 сут. Таким образом, время добегания максимального расхода воды от Ириклинского ГУ до г. Орск составляет ~1 сут и степень распыливания расхода не очень большая (расход снижается на ~900 м³/с).

На более протяженном участке от Орских ворот до г. Оренбурга трансформация гидрографа более заметная (максимальный расход снижается почти до 4 тыс. м³/с); причем ветвь подъема гидрографа становится очень крутой (от минимальных до максимальных значений расход нарастает за 1 сут, тогда как при сбросе с Ириклинской ГЭС это происходит за 6 сут). Это интересное явление (некий “кумулятивный эффект”) требует специального анализа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ АВАРИИ ИРИКЛИНСКОЙ ПЛОТИНЫ

Выполнены расчеты формирования и прохождения волны прорыва Ириклинского гидроузла для двух сценариев (не основано на реальной угрозе). Расчет образования прорыва в каменно-набросной плотине Ириклинской ГЭС выполнен по оригинальной методике. Учтены конструктивные особенности и фракционный состав грунта тела плотины. Выполнено моделирование распространения волны прорывного паводка в нижнем бьефе водохранилища и про-

анализированы возможные последствия при затоплении городов Орска и Оренбурга. К сожалению, в силу ограниченности объема настоящей публикации нет возможности детального описания процесса моделирования развития прорана и расчета зон затопления селитебных территорий.

Сценарии гидродинамической аварии на Ириклинской плотине

На основе сведений из декларации безопасности Ириклинского гидроузла [13] были назначены следующие сценарии гидродинамической аварии:

наиболее вероятный сценарий аварии — разрушение (проран) каменно-набросной плотины в результате потери устойчивости низового откоса и/или потери фильтрационной прочности ее тела и основания при УВБ, равном НПУ.

наиболее тяжелый сценарий аварии — разрушение (проран) каменно-набросной плотины вследствие перелива воды через гребень во время прохождения половодья с максимальным расходом воды обеспеченностью 0.1%.

Реализация сценариев на численной модели выполнялась следующим образом:

сценарий 1 происходит на фоне межени при уровне воды в Ириклинском водохранилище, равном НПУ, расход притока в водохранилище равен 60 м³/с;

сценарий 2 происходит на фоне половодья обеспеченностью 0.1% при уровне воды в Ириклинском водохранилище, превышающем ФПУ, расход притока в водохранилище задается согласно расчетному гидрографу, принятому из проекта ПИВР [15].

Начальными условиями для сценария 1 служат установившиеся течения при расходе 60 м³/с, порог водосброса Ириклинского гидроузла подобран на пропуск заданного расхода и соблюдение условия поддержания уровня НПУ в верхнем бьефе Ириклинского водохранилища. На гребне каменно-набросной плотины задается началь-

ный проран, заглубленный на 5 м ниже НПУ. Переток воды по начальному прорану приводит к размыву плотины, ширина раскрытия прорана определяется в процессе расчета.

Начальными условиями для сценария 2 служат установившиеся течения при расходе притока в водохранилище 334 м³/с (первая точка на расчетном гидрографе). Порог водосброса Ириклинского гидроузла подобран на пропуск заданного расхода и соблюдение условия поддержания уровня НПУ в верхнем бьефе Ириклинского водохранилища (предполоводная сработка в данном сценарии не рассматривается). Приток в водохранилище начинает нарастать в соответствии с принятым гидрографом половодья обеспеченностью 0.1%. По мере нарастания расхода притока начинается раскрытие водосбросной плотины. В момент времени, определяемый расчетом, уровень воды в Ириклинском водохранилище превысит отметку гребня каменно-набросной плотины, что приведет к ее разрушению (размыву). Максимальная ширина раскрытия прорана определяется расчетом.

Грунт тела каменно-набросной плотины задается одной фракцией с размером частиц $d_{50} = 350$ мм, $d_{90} = 500$ мм. Насыпи защитных дамб, автомобильных и железных дорог задаются неразмываемыми ввиду сложности и значительной протяженности участка моделирования.

Как упоминалось выше, рассмотренные сценарии гидродинамической аварии на Ириклинском гидроузле не основаны на реальной угрозе и являются гипотетическими.

Результаты расчетов волны прорыва Ириклинского гидроузла при разных сценариях

Сценарий 1. Максимальный расход через створ прорана при сценарии 1 составит ~30 800 м³/с и будет достигнут через 4 ч от момента начала аварии. Через 10 сут от начала аварии расход через проран становится равным расходу притока в водохранилище. Максимальные скорости течения в районе г. Орска для этого случая приведены на рис. 11. Скорости в сужениях под железнодорожным и автодорожным мостами достигают

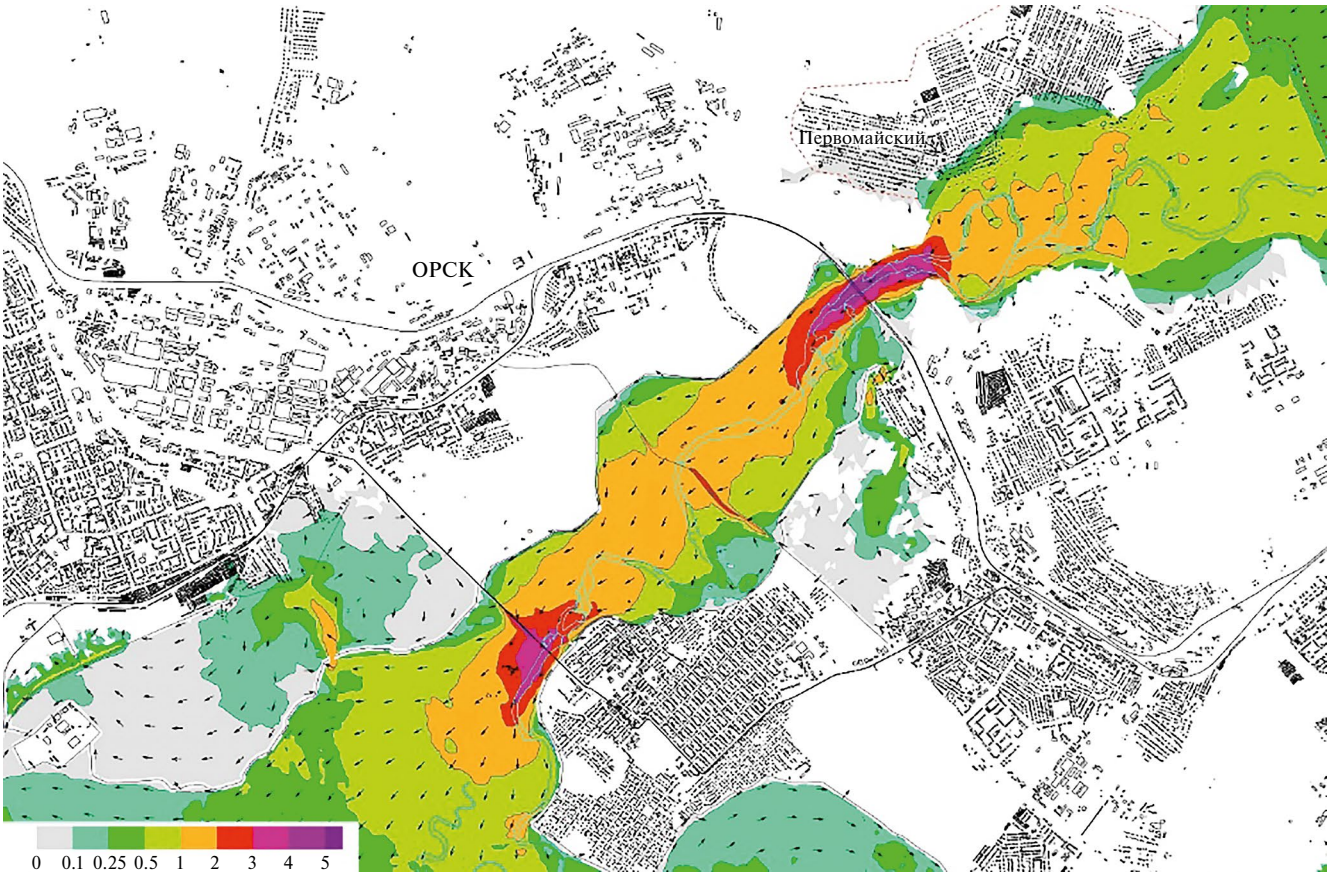


Рис. 11. Максимальные скорости течения в районе г. Орска при аварии на Ириклинской плотине по сценарию 1.

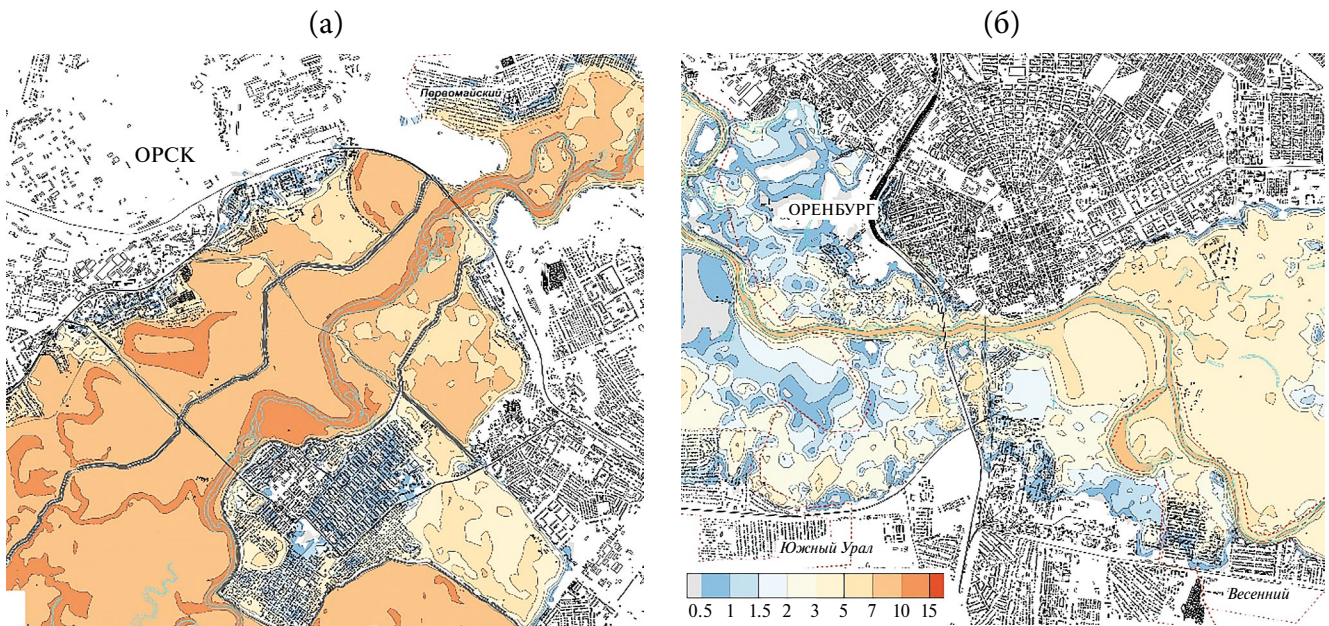


Рис. 12. Максимальные глубины затопления в городах Орске (а) и Оренбурге (б) при аварии на Ириклинской плотине по сценарию 1.

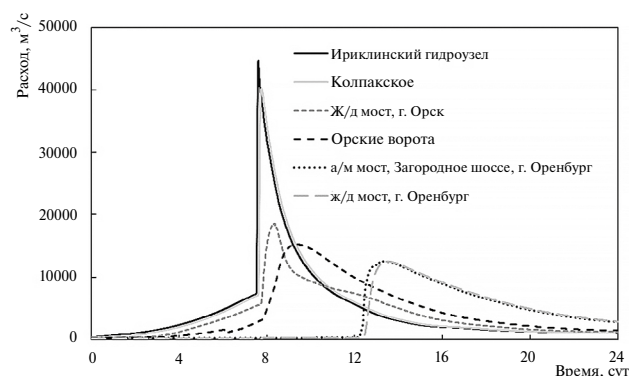


Рис. 13. Трансформация гидрографов прорывного паводка при аварии на Ириклинской плотине по сценарию 2.

3–4 м/с. Также построены поля максимальных глубин (рис. 12) и границы зон затопления.

Сценарий 2. Гидрограф излива через створ прорана и его трансформация по участку моделирования приведены на рис. 13. Максимальный расход через створ прорана при сценарии 2 составит ~45 000 м³/с и будет достигнут через 7.5 сут от момента начала расчета. Далее достаточно долго держится высокий расход, который суммируется из расходов притока 0.1% половодья и излива через проран, с постепенным снижением.

На графике рис. 13 видно, что “кумулятивный эффект” тоже присутствует. Время нарастания гидрографа в Орских воротах занимает ~3 сут, а у Оренбурга 0.5 сут. Такой эффект может быть связан с особенностями строения поймы и долины р. Урал на этом участке, с наличием больших зон аккумуляции, узких ущелий и пр. Недооценка и незнание таких и аналогичных эффектов может привести к негативным последствиям при попытке предупреждения и устранения чрезвычайных ситуаций, связанных с затоплением сельских территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты научно-исследовательской работы в значительной мере — демонстрация возможностей (достаточно неполной) разработанной численной гидродинамической модели среднего течения

р. Урал, которая может быть использована для оптимизации экологических и рыбных популяций Ириклинского гидроузла в соответствии с принимаемыми критериями, для обоснования высотно-планировочных решений при застройке пойменных территорий, для выбора оптимальных участков и параметров дноуглубления, для принятия управленческих решений при опасности возникновения чрезвычайных ситуаций. К этому хотелось бы привлечь внимание Государственных органов, принимающих решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексюк А.И., Беликов В.В. Моделирование течений мелкой воды с областями обмеления и разрывами дна // Журн. вычислительной математики и математической физики. 2017. Т. 57 (2). С. 316–338.
2. Алексюк А.И., Беликов В.В. Свидетельство 2017660266 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). № 2017617252. Оpubл. 20.09.2017. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
3. Беликов В.В. Вычислительный комплекс “TRIANA” — генератор сеток треугольных конечных элементов в произвольных плоских областях. ГосФАП СССР. П007705. 1984.
4. Беликов В.В., Алексюк А.И. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики. М.: РАН, 2020. 346 с.
5. Беликов В.В., Алексюк А.И., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В. Особенности численного гидродинамического моделирования протяженных участков рек // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 367–384.
6. Беликов В.В., Алексюк А.И., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Глотко А.В. Численное моделирование течений и деформаций дна в бьефах гидроузлов. М.: ЯНУС-К, 2023. 304 с.
7. Беликов В.В., Алексюк А.И., Васильева Е.С. Численное моделирование волн прорыва. М.: РАН, 2023. 301 с.
8. Беликов В.В., Милитеев А.Н., Кочетков В.В. Свидетельство 2001610638 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Комплекс программ для

- расчета волн прорыва (БОР). № 2001610454. 2001. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
9. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Метод Годунова с модификацией Колгана для численного решения двумерных уравнений мелкой воды // Тр. X конф. молодых ученых Моск. физ.-техн. ин-та (1985). Деп. в ВИНТИ Ч. 1. № 5983-85 Деп. с. 179–214.
 10. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Численный метод распада разрыва для решения уравнений теории мелкой воды // Журн. вычисл. математики и математ. физики. 1997. Т. 37. № 8. С. 1006–1019.
 11. Васильева Е.С., Беликов В.В. Численное моделирование каскадной гидродинамической аварии на Верхнеуральской и Магнитогорской плотинах // Гидротехн. стр-во. 2023. № 8. С. 36–44.
 12. Глобальная цифровая модель поверхности ALOS “ALOS World 3D-30m (AW3D30)” https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm
 13. Декларация безопасности ГЭС Ириклинской ГЭС. Рег. № 22-22 (05) 0030-00-ГЭС. УТВ. 21 декабря 2021 г. п. Энергетик, Оренбургская обл., 2021.
 14. Основные положения правил использования водных ресурсов Ириклинского водохранилища на р. Урале. М.: Мин-во мелиорации и водного хозяйства РСФСР, Упр. по регулированию использования вод. ресурсов, 1973.
 15. Проект правил использования водных ресурсов Верхне-Уральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ. Екатеринбург: СевКавНИИВХ, 2013 г.
 16. Aleksyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // J. Comp. Phys. 2019. V. 390. P. 232–248. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001>
 17. Aleksyuk A.I., Malakhov M.A., Belikov V.V. The exact Riemann solver for the shallow water equations with a discontinuous bottom // J. Comp. Phys. 2022. V. 450. P. 110801. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110801>

A NUMERICAL HYDRODYNAMIC MODEL OF A LONG SEGMENT OF THE URAL RIVER AND ITS APPLICATION TO ASSESSING THE INUNDATION RISK OF RESIDENTIAL AREAS BY FLOODS AND BREAKTHROUGH WAVES

V. V. Belikov^{a, *}, N. M. Borisova^a, E. S. Vasil'eva^{a, **}, A. V. Glotko^{a, b}, T. A. Fedorova^a

^aWater Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

^bMoscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, 129337 Russia

*e-mail: belvv@bk.ru

**e-mail: vasilevae@yandex.ru

A numerical hydrodynamic model was constructed for the segment of the Ural River from the Iriklienskoe Reservoir (inclusive) to a site 30 km downstream of the Sakmara River inflow; therefore, the total length of the model reach was >700 km. To reduce the time of model development and to accelerate the calibration and variant calculations, the segment was divided into three successive parts of the channel, interacting through consistent boundary conditions. The simulation is carried out with the use of a domestic highaccuracy software package STREAM 2D CUDA, taking into account abrupt changes in bottom elevation and multifractional soil composition. The model was calibrated for constant water discharges. Calculations were carried out for a spring flood with an exceedance probability of 1% and a breakthrough wave of the Iriklienskii Hydropower System under two scenarios. Maximal water levels, depths, and inundation zones were obtained. An effect of a many-time increase in the steepness of the leading front of the flood wave within the domain was revealed.

Keywords: spring flood, breakthrough wave, numerical hydrodynamic modeling, dam break, outflow hydrograph, inundation depths and areas.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАСЕЙНА р. УРАЛ И МЕРЫ ПО ЕГО УЛУЧШЕНИЮ

© 2024 г. Г. С. Ермакова^{a, b, *}, И. Ю. Милютин^{a, b}, А. А. Строков^{a, b},
Г. Ш. Турсунова^{a, b}, И. В. Землянов^{a, b}

^aГосударственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, 119034 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: ermakova_gs@mail.ru

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 14.03.2024 г.

Принята к публикации 14.03.2024 г.

Представлены результаты комплексной оценки экологического состояния водных объектов российской части бассейна р. Урал. Оценка проведена с использованием данных многолетнего государственного мониторинга качества вод, статистических данных, данных дистанционного зондирования, результатов специализированных научных исследований, а также материалов собственных полевых обследований водных объектов и водосборов и лабораторного анализа проб воды. На основе собранной базы материалов дана характеристика актуального экологического состояния водных объектов и пространственной неравномерности хозяйственного освоения территории водосбора. С учетом всех имеющихся материалов составлен каталог водных объектов, ранжированный по уровню нагрузки на водные объекты. Для водных объектов, испытывающих наибольшую нагрузку и характеризующихся значимыми нарушениями качества вод, предложен комплекс мер, направленных на улучшение их экологического состояния. Меры предложены на основе анализа российского и зарубежного опыта водоохранных мероприятий, в том числе с использованием технологий природоприближенного восстановления водных объектов. Предложения носят комплексный характер и опираются на бассейновый подход.

Ключевые слова: река Урал, качество вод, уровень загрязненности, экологическое состояние, антропогенная нагрузка, мероприятия для водных объектов.

DOI: 10.31857/S0321059624050074 **EDN:** VXQUNE

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн р. Урал относится к регионам со значительным уровнем развития производственной и сельскохозяйственной деятельности. В пределах территории бассейна выделяются зоны с повышенной антропогенной нагрузкой, что сказывается на качестве вод и экологическом состоянии водных объектов, находящихся в зоне влияния хозяйственных объектов.

Проведено комплексное исследование экологического состояния водных объектов российской части бассейна р. Урал, выявлены водные объекты, находящиеся в зоне риска вследствие активного развития антропогенной деятельности на их водосборах. На рис. 1 представлена общая схема работы, реализованная в рамках проведенного исследования.

В ходе работ проанализирована пространственная неоднородность хозяйственного освоения водосбора, на основе анализа гидрохимических данных дана характеристика актуального экологического состояния водных объектов. Одновременный анализ и факторов, приводящих к загрязнению водных объектов, и непосредственно гидрохимических показателей, свидетельствующих о негативном влиянии антропогенной деятельности на качество вод, позволяет составить наиболее полное представление об экологической ситуации в бассейне.

В результате обобщения собранных материалов был составлен перечень водных объектов, которые в силу воздействия ряда антропогенных факторов характеризуются значимым ухудшением экологического состояния. Водные объекты ранжированы и распределены по четырем категориям в зависимости от уровня нагрузки. При определении



Рис. 1. Схема исследования.

уровня нагрузки учитывалась интенсивность хозяйственной деятельности на водосборе, наличие косвенных и прямых факторов антропогенной нагрузки, а также оценки качества вод по единичным и комплексным абиотическим показателям, которые характеризуют степень неблагополучия экологического состояния водного объекта.

Водные объекты и их участки, испытывающие наибольшую антропогенную нагрузку и характеризующиеся наиболее значимыми нарушениями качества вод, отнесены к категории приоритетных, для них предложен набор мер, направленных на комплексное улучшение экологического состояния.

При выполнении работы проводилось совмещение камеральных, полевых и лабораторных методов исследования. Предварительный перечень участков составлен на камеральном этапе в результате анализа и обобщения материалов по теме исследования. На последующем этапе работы собранный архив информации дополнен результатами полевых обследований водных объектов и водосборов и лабораторных анализов проб вод на гидрохимические показатели.

При формулировании комплекса водоохранных мер авторы опирались на опыт многолетних

исследований в этой области, были обобщены различные подходы, применяемые для улучшения экологического состояния водных объектов в отечественной и зарубежной практике.

ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ВОДОСБОРА

Для оценки интенсивности хозяйственной деятельности и анализа неравномерности распределения антропогенной нагрузки собран архив материалов по хозяйственному освоению водосбора р. Урал. В работе использованы статистические данные по социально-экономическим показателям, данные государственного кадастра месторождений и проявлений полезных ископаемых, государственного реестра объектов размещения отходов, перечня объектов накопленного экологического вреда, документы территориального планирования, открытые базы геоданных, данные дистанционного зондирования, данные официальной статистики по водоотведению, научные обобщения и публикации по теме. Собранный архив информации дополнен результатами полевых обследований.

Анализ неравномерности пространственного распределения факторов антропогенной нагрузки проведен в разрезе 50 частных водосборов. Среди основных антропогенных факторов,

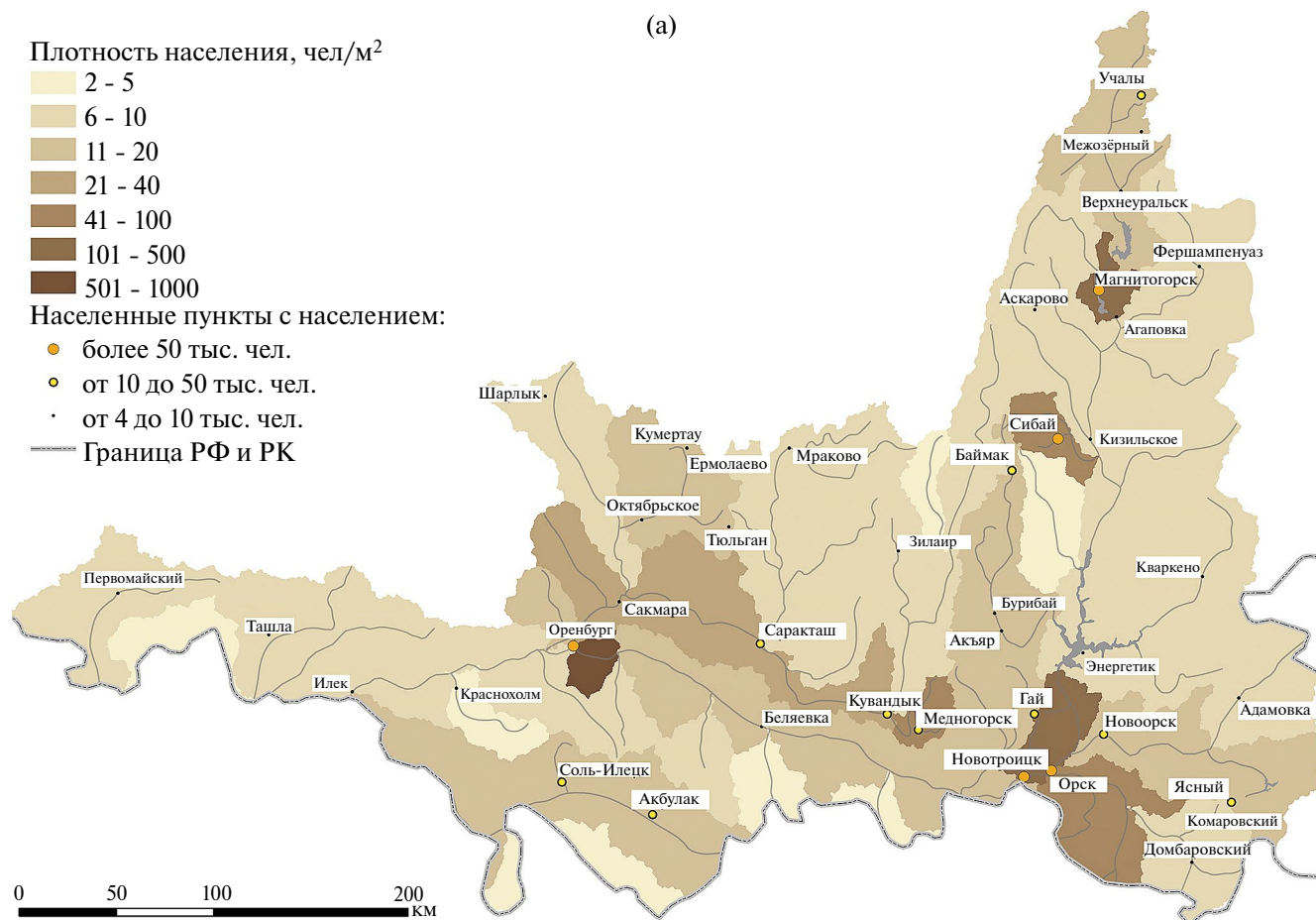


Рис. 2. Распределение селитебной (а), производственной (б), транспортной (в) и сельскохозяйственной (г) нагрузки по 50 частным водосборам в российской части бассейна р. Урал.

формирующих нагрузку на водные объекты, можно выделить селитебную нагрузку (рис. 2а), развитие промышленного комплекса (рис. 2б) и транспортной инфраструктуры (рис. 2в), сельскохозяйственное освоение территории водосбора (рис. 2г), наличие объектов накопленного экологического вреда и объектов размещения отходов (рис. 2б).

Главные антропогенные факторы загрязнения водных объектов в бассейне р. Урал — производственный и селитебный. К территориям с наибольшей антропогенной нагрузкой относятся участки водосбора, в пределах которых расположены города с численностью населения более 20 тыс. человек, совмещенные с крупными промышленными, преимущественно добывающими и горно-обогатительными, центрами: Оренбург, Магнитогорск, Орск, Новотроицк,

Гай, Медногорск, Сибай, Баймак, Учалы в РФ и Актобе и Хромтау в Республике Казахстан (РК). Помимо максимальной селитебной и производственной нагрузки для этих участков характерны также наличие крупных транспортных узлов и наибольшая концентрация объектов, входящих в государственный реестр объектов размещения отходов (ГРОРО). Соответственно, к водным объектам, расположенным в зоне наибольшего антропогенного воздействия, относятся реки Блява, Таналык, Худолаз, Орь, Илек, Сухая Губерля, Елшанка, Колпачка, а также Магнитогорское водохранилище и р. Урал в районе городов Орска, Новотроицка и Оренбурга.

Меньшая антропогенная нагрузка характерна для территорий с месторождениями полиметаллических руд (бассейны рек Губерли, Камсак, Кумак, Джусы, Урляды, Узельги), угольных (бассейн

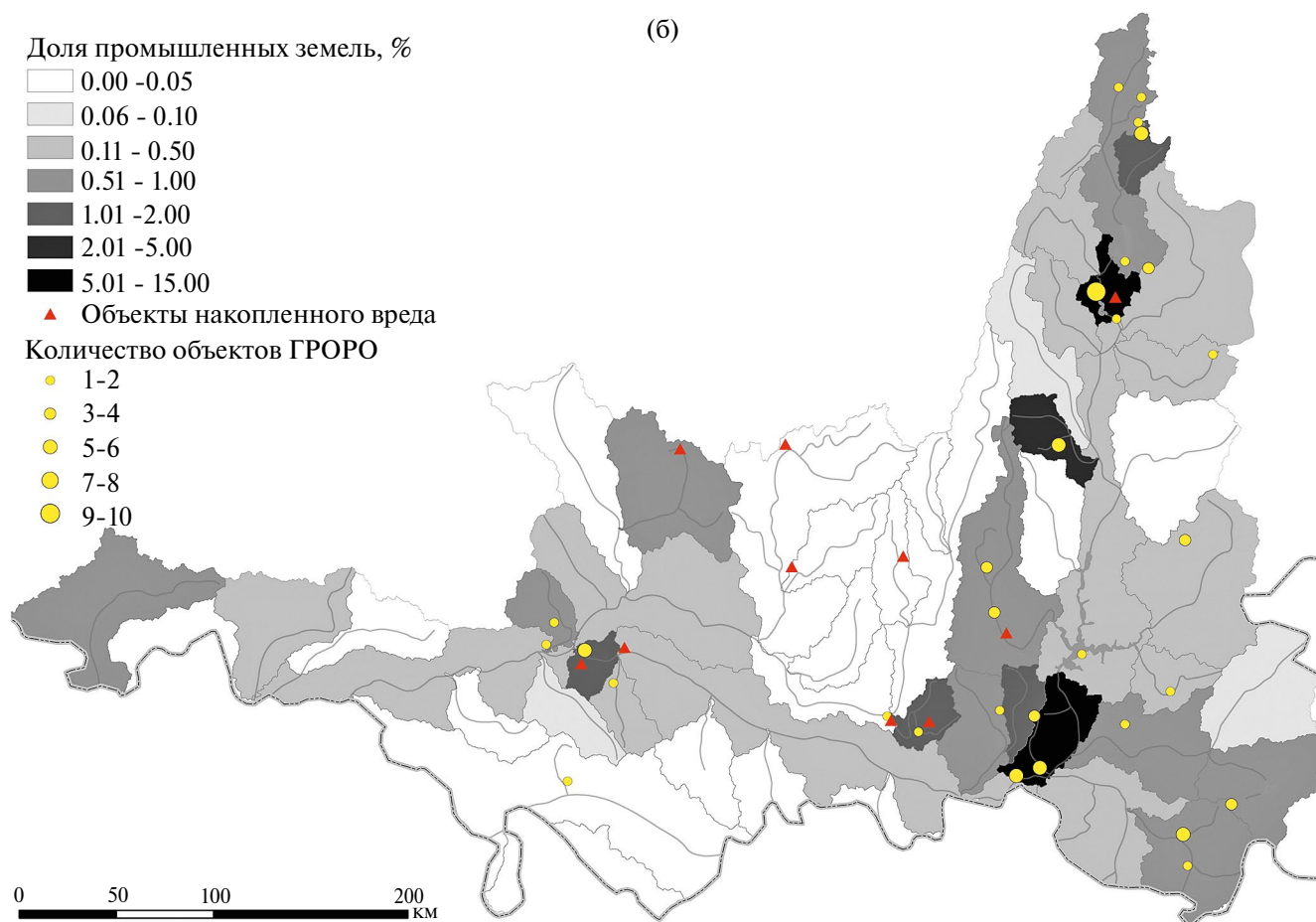


Рис. 2. Продолжение.

р. Большой Юшатырь) и нефтегазовых (бассейн р. Чаган) месторождений и территорий, характеризующихся высокой степенью сельскохозяйственного освоения (бассейны рек Киндели, Иртек, Салмыш, Каргалки, низовья р. Сакмары).

Прямая нагрузка на водные объекты оценена в объемах сброса сточных вод, относящихся к категории загрязненных. Анализ данных о водоотведении по отдельным водным объектам [1] показал, что по абсолютным величинам наибольшие объемы загрязненных сточных вод сбрасываются в р. Урал и ее притоки с очистных сооружений городов Оренбурга, Магнитогорска, Орска, Новотроицка, Гай, п. Межозёрного, которые суммарно сбрасывают 92% загрязненных сточных вод на водосборе. Что касается относительных величин, сравнение объемов сброса загрязненных сточных вод с объемом стока реки, в которую производится сброс, показало, что наихудшее соотношение этих величин харак-

терно для небольших рек: Сухой Речки (г. Магнитогорск), Узельги (п. Межозерный), Елшанки (приток р. Илек, г. Соль-Илецк), Карагайлы (приток р. Худолаз, г. Сибай), Дунайки (приток р. Сухая Губерля, г. Гай), Шандаши (г. Ясный), Блявы (г. Медногорск).

ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ ВОД

На основе анализа гидрохимических данных дана характеристика загрязненности и качества воды водных объектов в бассейне р. Урал. В целях получения комплексного представления о качестве вод собран, проанализирован и обобщен архив материалов многолетних режимных наблюдений на пунктах сети Росгидромета и Казгидромета и научных публикаций по теме исследования.

За основу анализа взяты результаты многолетнего государственного гидрохимического мониторинга водных объектов. В российской части

(в)

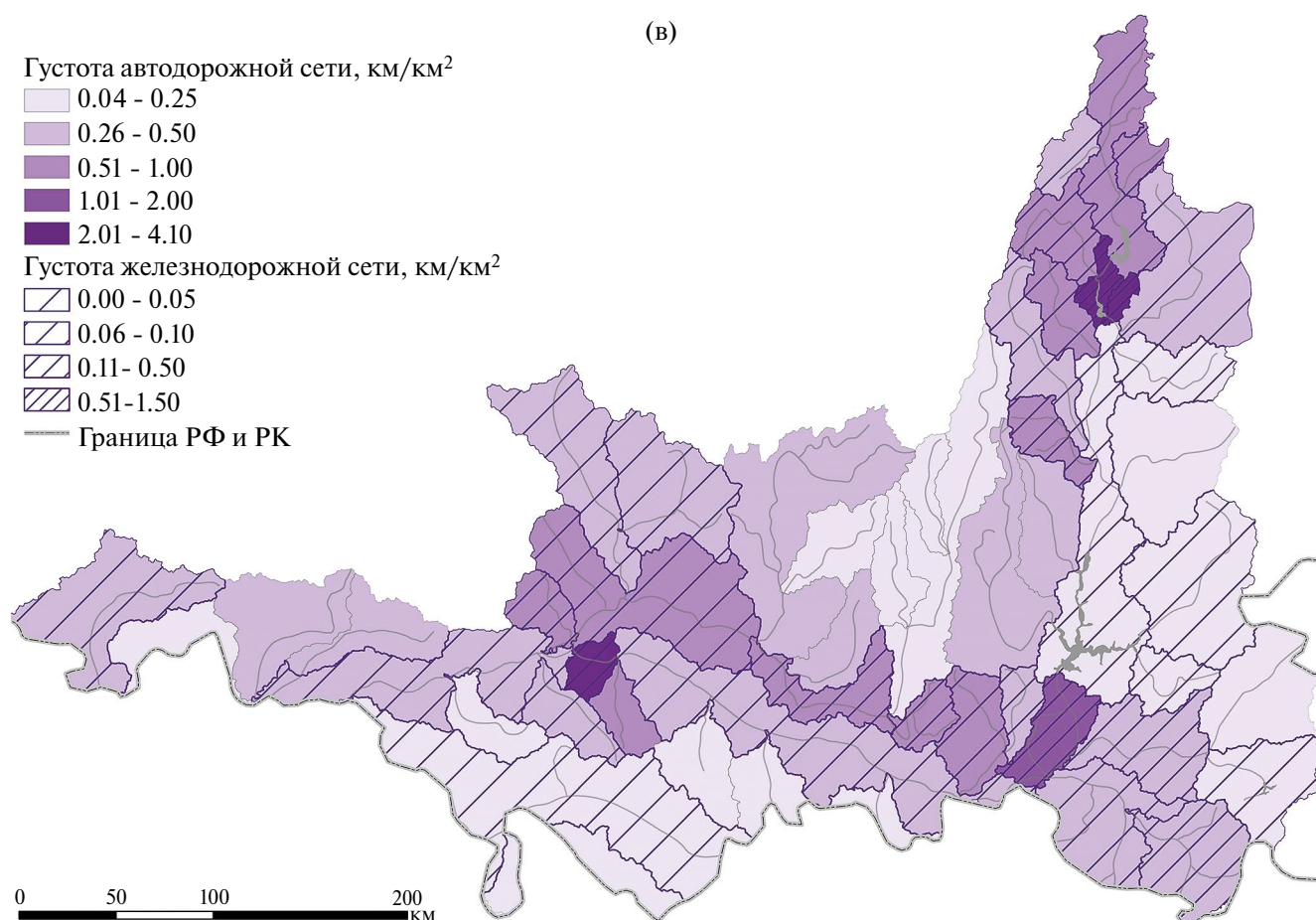


Рис. 2. Продолжение.

бассейна мониторинг ведется силами Оренбургского и Челябинского ЦГМС и Башкирского УГМС на 36 створах, на территории РК — на 37 створах Казгидромета.

Из ежегодников качества поверхностных вод РФ [21] и региональных докладов о состоянии окружающей среды по отдельным субъектам РФ [16, 17, 19] собраны сведения о результатах гидрохимического мониторинга за 2011–2021 гг. По створам мониторинга определены средние классы качества вод по удельному комбинаторному индексу загрязненности вод (УКИЗВ) за период 2015–2021 гг. (рис. 3) и наиболее типичные загрязняющие вещества (ЗВ) (рис. 4), составлен каталог случаев высокого и экстремально высокого загрязнения (ВЗ и ЭВЗ).

Наибольшая загрязненность вод в российской части бассейна характерна для Магнитогорского водохранилища и р. Урал ниже г. Магнитогорска (в среднем за 2015–2021 гг. класс 4 “а” — вода

грязная), р. Блявы (класс 4 “г” — очень грязная) и р. Илек (класс 4 “а” — грязная) (рис. 3).

Отмечено стабильное и практически повсеместное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по меди — повторяемость превышения 91–100% в разные годы, очень частое превышение по ХПК (83–97%) и марганцу (76–98%), частое превышение по цинку (36–73%), БПК₅ (56–70%) и сульфатам (34–57%) (рис. 4) [21]. Регулярные нарушения (в среднем от 18 до 35%) отмечаются по содержанию нитритного и аммонийного азота, железа, нефтепродуктов [21].

По перечисленным выше наиболее загрязненным водным объектам регулярно фиксируются случаи ВЗ и ЭВЗ, чаще всего — по меди (до 800 ПДК), цинку (до 300 ПДК) и соединениям азота (до 200 ПДК). Отмечены также разовые случаи ВЗ и ЭВЗ воды по нефтепродуктам в р. Елшанке в г. Орске (125 ПДК), по мышьяку в р. Бляве

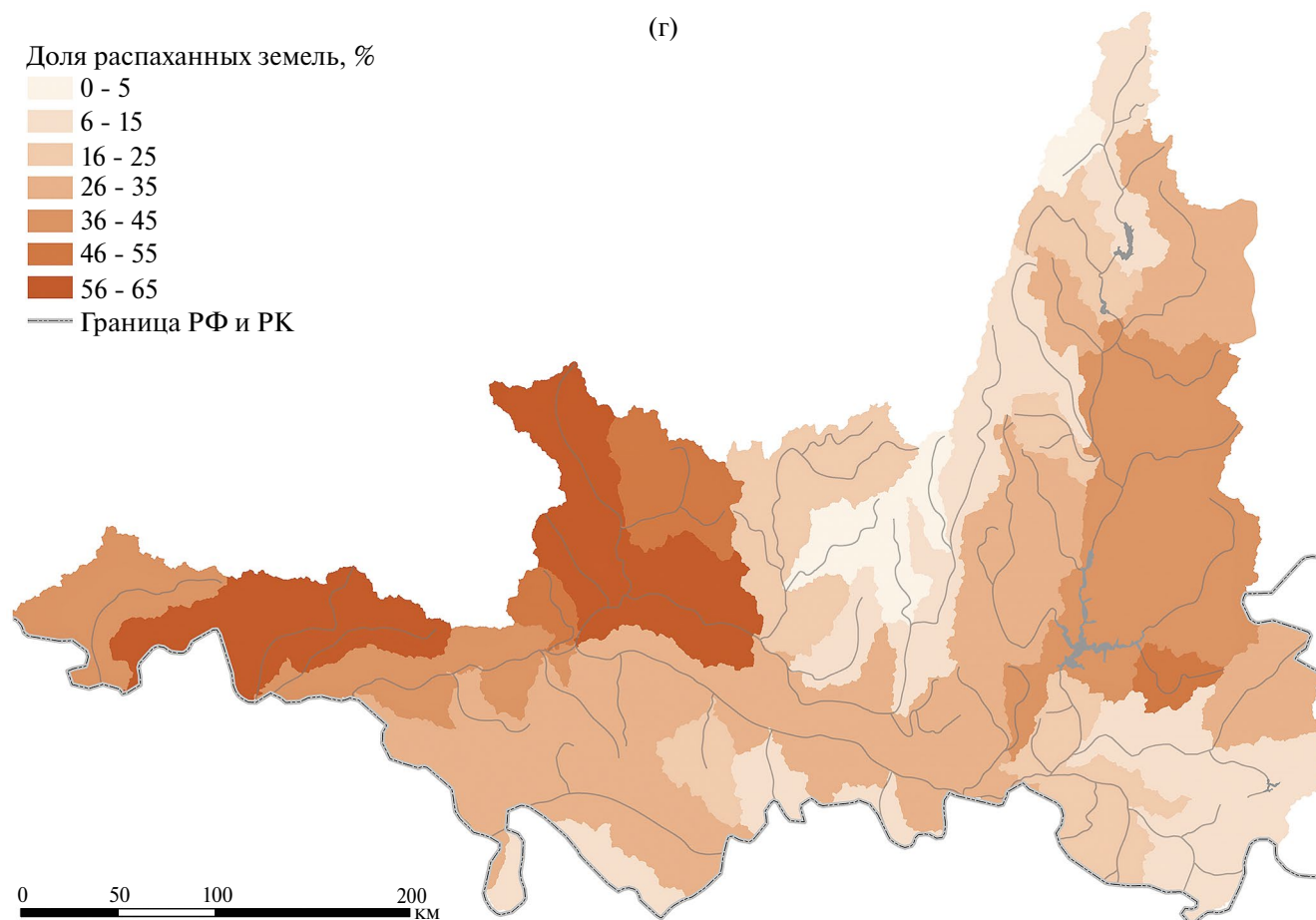


Рис. 2. Окончание.

(3 ПДК) и по марганцу (47 ПДК) в Магнитогорском водохранилище [16, 17, 19].

По данным Национальных докладов о состоянии окружающей среды и использовании природных ресурсов РК [28] и информационных бюллетеней о состоянии окружающей среды по Западно-Казахстанской и Актюбинской областям получены характеристики качества вод для трансграничных водных объектов на территории РК за период 2011–2021 гг. Мониторинг качества вод трансграничных водных объектов в РК ведется на шести пунктах наблюдения на реках Урал, Илек, Ори, Хобде и Чаган. Наибольшей загрязненностью вод характеризуются реки Илек и Орь. Типичные ЗВ — медь, марганец, соединения азота, железо, цинк, нефтепродукты, фенолы, реже — хлориды, наблюдается регулярное снижение концентрации растворенного кислорода [28]. Для р. Илек особо выделяются шестивалентный хром и бор. В пределах РК в створах

наблюдений на р. Илек в воде практически ежегодно фиксируются случаи ВЗ и ЭВЗ по этим показателям [28].

Так как в бассейне р. Урал имеются участки, не покрытые сетью регулярных наблюдений за качеством вод, но при этом очевидно находящиеся в зоне значимого антропогенного воздействия, то для восполнения пробелов в данных мониторинга по этим объектам к анализу были также привлечены материалы научных исследований. При аналитическом обзоре результатов исследований прошлых лет собран архив, состоящий из более чем 200 публикаций, посвященных анализу экологического состояния водных объектов, загрязненности вод и донных отложений в бассейне р. Урал (наиболее значимые — [2, 4–9, 13, 14, 26, 27, 30, 35, 36, 41] и др.).

Обобщение материалов публикаций позволило расширить составленный по данным го-

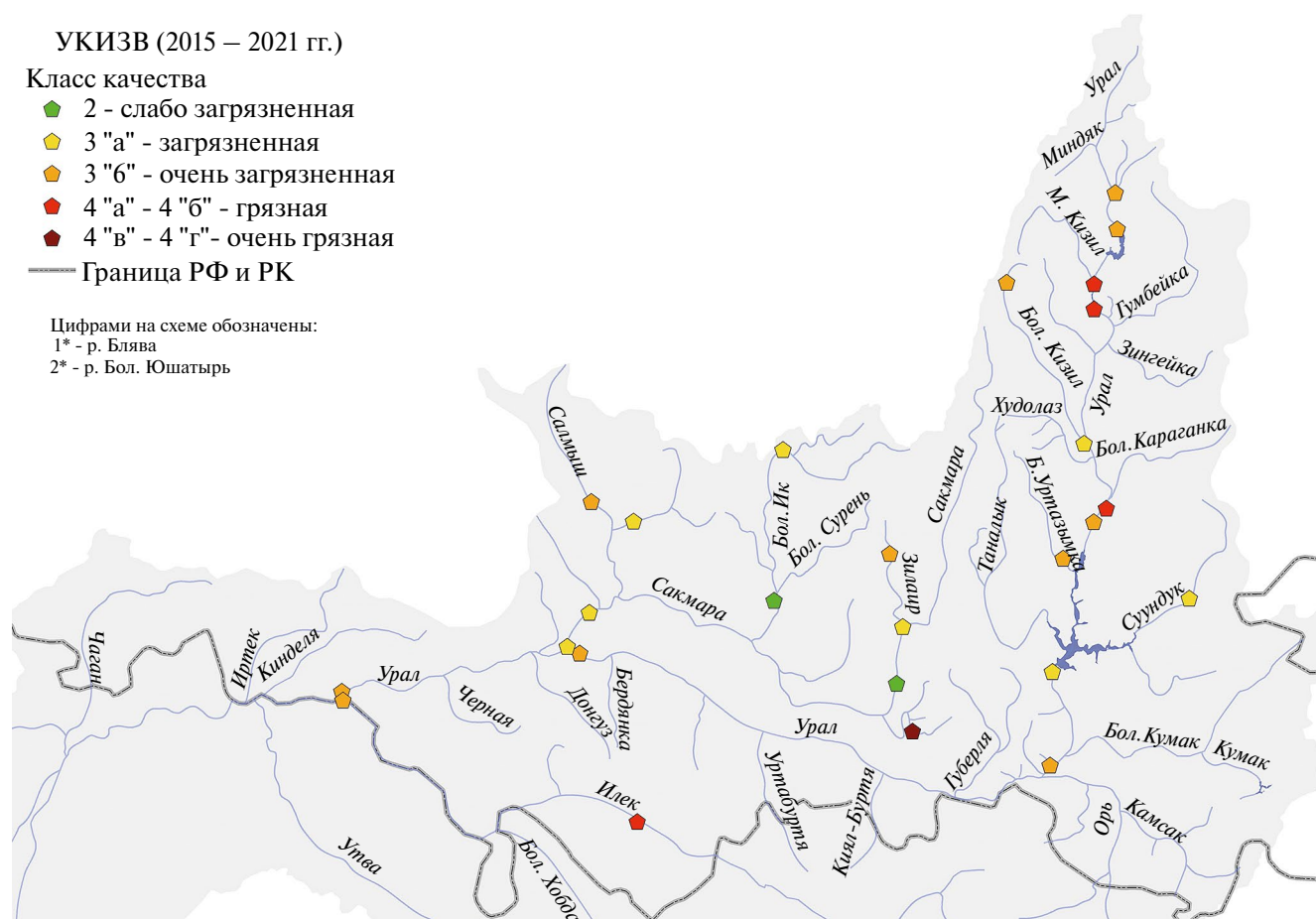


Рис. 3. Средний за 2015–2021 гг. УКИЗВ водных объектов бассейна р. Урал, по данным [16, 17, 19, 21].

сударственного мониторинга перечень водных объектов, характеризующихся неблагоприятным экологическим состоянием. Среди прочего в перечень водных объектов были включены реки

Худолаз, Таналык, Сухая Губерля, Чаган, Джуса и пр. Также данные публикаций позволили дополнить перечень характерных ЗВ по некоторым водным объектам, в частности – свинец, кадмий, кобальт, магний, фосфаты, фториды и пр.

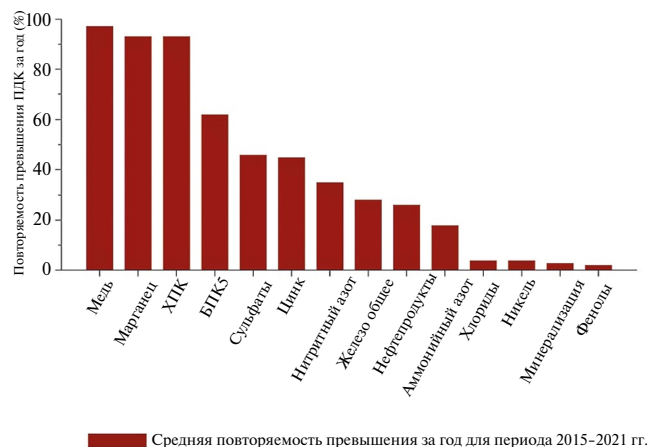


Рис. 4. Типичные загрязняющие вещества и показатели по бассейну р. Урал за 2015–2021 гг., по данным [21].

На основе собранного архива материалов были предварительно намечены водные объекты, предлагаемые к включению в перечень участков с неблагоприятным экологическим состоянием, определены характерные для них ЗВ. Эти материалы послужили основой для разработки программы экспедиционных работ и лабораторных исследований проб вод – назначения створов отбора проб воды, перечня определяемых гидрохимических показателей.

Экспедиционные работы выполнялись в бассейне р. Урал в период летней межени в июле 2022 г. В ходе них было проведено экспресс-исследование российской части бассейна р. Урал на

56 створах: 21 створ непосредственно на р. Урал и 35 — на его притоках. Обследование включало рекогносцировочное описание водных объектов и прибрежных территорий, полевую гидрохимию, отбор и консервацию проб воды, измерение расходов воды.

Исследование проб воды проведено по 30 показателям. Основной набор показателей, в который входят наиболее типичные для бассейна р. Урал ЗВ (14 шт.), определялся на всех 56 створах. Дополнительный набор показателей назначался индивидуально для каждого створа на основе собранных ранее материалов и с учетом специфики хозяйственной деятельности.

Непосредственно в поле определялись содержание растворенного кислорода, pH, общая минерализация, электропроводность, содержание взвешенных веществ и БПК₅. Остальные гидрохимические анализы выполнялись в аккредитованных лабораториях: химической лаборатории Ивановской научно-исследовательской станции и лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области.

Загрязненность водных объектов оценивалась по единичным и комплексным показателям по результатам проведенной гидрохимической съемки. В качестве единичных показателей вычислялись относительные концентрации ЗВ в долях ПДК, которые принимались согласно [29, 34]. Всего определено 1064 показателя.

Результаты исследования (рис. 5) показали, что превышение ПДК по меди наблюдалось на 100% створов, по марганцу и цинку — на 90–95%, по ХПК и сульфатам — на 50–60%. Нарушение нормативов качества по содержанию растворенного кислорода отмечено на 73% створов. Частые нарушения (20–45%) отмечены также по БПК₅, нитритному азоту, никелю, фосфатам, магнию и нефтепродуктам. Из веществ классов опасности 1 и 2 зафиксированы превышения ПДК по свинцу (25 случаев), кадмию (17) и мышьяку (3).

При проведении химических анализов фиксировались случаи ВЗ и ЭВЗ. Всего выявлено 19 случаев ВЗ на 11 водных объектах и 8 случаев ЭВЗ на 5 водных объектах (табл. 1). Наибольшее

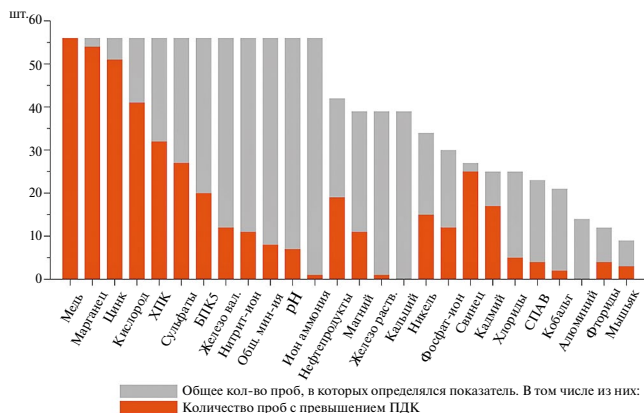


Рис. 5. Результаты гидрохимической съемки в бассейне р. Урал по единичным показателям по данным полевого обследования 2022 г.

количество случаев ВЗ и ЭВЗ зафиксировано по содержанию свинца (7 случаев), меди (5), кислорода (4) и кадмия (3 случая).

Для комплексной оценки загрязненности вод использованы подходы, изложенные в [33]. В частности, проведен расчет коэффициента комплексности загрязненности воды K , коэффициента комплексности высокого уровня загрязнения воды $K_{ВЗ}$, коэффициента комплексности экстремально высокого уровня загрязнения воды $K_{ЭВЗ}$ [33]. Значение коэффициента комплексности загрязненности воды K (рис. 6а) в 73% створов бассейна р. Урал составляет $>40\%$, что соответствует категории III загрязненности воды.

Также проведен расчет индекса загрязненности вод (ИЗВ) по [11] (рис. 6б). С учетом специфики бассейна для расчета ИЗВ выбран следующий набор показателей: растворенный кислород, БПК₅, сульфаты, медь, цинк, марганец. На 50% створов вода относится к категории умеренно-загрязненной и загрязненной, на 29% — грязной, 16% — очень грязной и 5% — чрезвычайно грязной.

В итоге по данным гидрохимического обследования 2022 г. составлен перечень створов, для которых зафиксировано наихудшее качество вод: Магнитогорское водохранилище в г. Магнитогорске, р. Таналык ниже с. Бурибай и р. Блява ниже г. Медногорска, а также р. Урал в районе г. Орен-

Таблица 1. Зафиксированные случаи высокого и экстремально высокого загрязнения вод в бассейне р. Урал по данным полевого обследования 2022 г.

Местоположение створа отбора пробы	Высокое загрязнение	Экстремально высокое загрязнение
Магнитогорское вдхр – г. Магнитогорск	–	52 ПДК – марганец
р. Урал – с. Нежинка	40 ПДК – медь	
р. Урал – г. Оренбург	32 ПДК – медь	
р. Худолаз – с. Калинино	32 ПДК – медь 3.3 ПДК – свинец	–
р. Джуса (Жуса) – п. Слюдяной	3.3 ПДК – кадмий 3.3 ПДК – свинец	–
р. Большая Уртазымка – с. Ургаза	18 ПДК – цинк	–
р. Таналык – г. Баймак	36 ПДК – нитрит–ион 25 ПДК – фосфат–ион 3.2 ПДК – свинец	–
р. Таналык – ниже устья р. Бузалвык	4.1 ПДК – кадмий 3.2 ПДК – свинец	–
р. Таналык – с. Бурибай	–	55 ПДК – медь
р. Орь – с. Истемис	–	1.60 мг/л – кислород
р. Блява – устье	25 ПДК – цинк 3.5 ПДК – свинец	277 ПДК – медь 167 ПДК – марганец 15 ПДК – кадмий
р. Салмыш – с. Новоархангельское	2.1 мг/л – кислород	–
р. Илек – пос. Илек	3.3 ПДК – свинец	
р. Елшанка (приток р. Илек) – г. Соль–Илецк	48 ПДК – фосфат–ион	53 ПДК – нитрит–ион 1.65 мг/л – кислород
р. Чаган – с. Луч	2.6 мг/л – кислород 3 ПДК – свинец	–
Всего случаев	19	8
в том числе по веществам 1 и 2 класса опасности	9	1

бурга, р. Худолаз ниже г. Сибая, р. Большая Уртазымка в с. Ургаза, р. Таналык ниже г. Баймака, р. Джуса, р. Орь в с. Истемис, р. Сухая Губерля ниже г. Гай, р. Илек в пограничном створе и устье, р. Елшанка ниже г. Соль-Илецка, р. Чаган ниже п. Первомайского. Результаты полевых и лабораторных работ во многом подтверждают и дополняют перечень водных объектов, составленный на камеральном этапе.

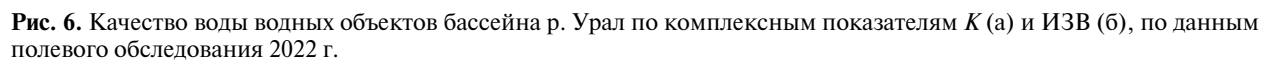
РАНЖИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО УРОВНЮ НАГРУЗКИ

В результате совокупного анализа материалов камерального, полевого и лабораторного этапов работ составлен каталог водных объектов (или их участков) российской части бассейна р. Урал. Водные объекты ранжированы по уровню нагрузки, который косвенно отражает степень неблагоприятия их экологического состояния. Ранжирование проведено на основе экспертной

оценки с учетом всей собранной информации о загрязненности вод и хозяйственном освоении водосборов.

При ранжировании выделено 4 уровня нагрузки на водные объекты: экстремально высокий, высокий, средний и низкий. Для наиболее крупных рек бассейна (Урал, Сакмара, Таналык) ввиду неоднородности степени антропогенной нагрузки и загрязненности вод по длине реки ранжирование проведено не для всего водного объекта в целом, а для его участков. Всего в каталоге значится 83 участка на 73 водных объектах (55 рек, 4 водохранилища и 14 озер).

На рис. 7 представлено графическое отображение выделенных участков. Предложенное распределение водных объектов и их участков по четырем категориям позволяет сфокусировать внимание на наиболее острых проблемах водосбора, выявить первоочередные задачи по



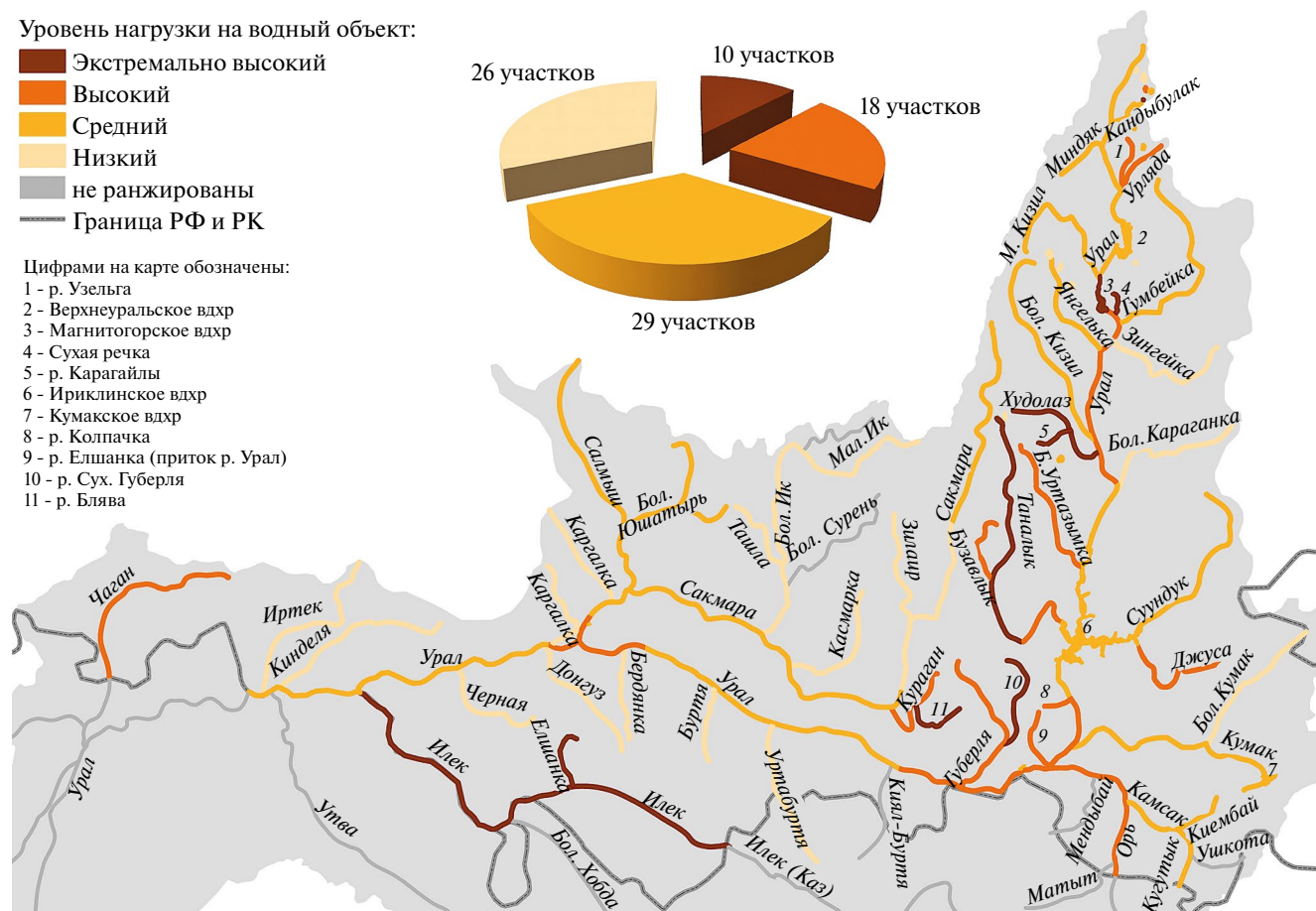


Рис. 7. Водные объекты российской части бассейна р. Урал, ранжированные по уровню нагрузки.

улучшению экологического состояния водных объектов, обозначить ключевые участки для реализации водоохранных мероприятий.

К водным объектам с экстремально высоким уровнем нагрузки отнесены реки Таналык, Худолаз с притоком Карагайлы, Сухая Губерля, Илек, Блява, Елшанка (приток р. Илек), Магнитогорское водохранилище и р. Сухая Речка (г. Магнитогорск), а также оз. Малое Учалы.

К водным объектам с высоким уровнем нагрузки отнесены реки Урляда, Узельга, Большая Уртазымка, Бузавлык, Джуса, Елшанка (приток р. Урал), Колпачка, Губерля, Ор, Чаган, Кураганка, участки р. Урал в пределах и ниже городов Магнитогорск, Орск, Новотроицк, Оренбург, участок р. Сакмары в Оренбурге, а также оз. Большое Учалы.

Перечисленные участки водных объектов с высоким и экстремально высоким уровнем на-

грузки отнесены к приоритетным при разработке комплекса мер по снижению антропогенной нагрузки, экологической реабилитации и природоприближенному восстановлению водных объектов. Среди них выделены пилотные участки, на которых предлагается реализовывать конкретные меры в зависимости от вида нагрузки. Для остальных участков предложены общие направления действий по предотвращению ухудшения текущей ситуации.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕРЫ ПО УЛУЧШЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Разработка комплекса мер по улучшению экологического состояния водных объектов в бассейне р. Урал основана на обзоре отечественного и зарубежного опыта проведения водоохранных мероприятий и экологической реабилитации водных объектов, а также современных методов и технологий, применяемых при природоприбли-

женном восстановлении водных объектов [18, 32, 37, 42–45].

Концептуальная основа разработки реабилитационных мероприятий на водных объектах — экосистемный подход [31]. Устранение причин, вызывающих нарушение и деградацию экосистем, позволяет проводить работы по восстановлению водных экосистем с большей эффективностью. Первый шаг при реализации проектов по восстановлению водных объектов — решение проблемы, связанной с низким качеством вод, которое является основным ограничивающим фактором условий обитания гидробионтов [42].

При решении проблемы низкого качества вод необходим бассейновый подход, при котором нельзя рассматривать отдельные участки водных объектов в отрыве от остальной гидрографической сети и всего водосбора в целом, включая области формирования стока. Реабилитационные мероприятия, проводимые непосредственно на водных объектах, могут помочь избавиться от уже накопленного вреда, но не могут предотвратить дальнейшее загрязнение. Поэтому необходимы комплексные действия, которые предполагают не только устранение последствий загрязнений в акватории водных объектов, но и целенаправленные действия по сокращению поступления ЗВ от объектов антропогенной деятельности на водосборе.

Комплекс мероприятий по восстановлению водных объектов принято делить [37] на 3 группы по месту проведения мероприятий и работ: на водосборе, в акватории водного объекта, на пойменных и прибрежных территориях. Это позволяет учесть самые разнообразные факторы, влияющие на экологическое состояние реабилитируемого водного объекта.

Мероприятия на водосборах

Первоочередные мероприятия на водосборе должны быть направлены на снижение ущерба от основных источников диффузного и точечного загрязнения. Группа мероприятий, проводимых на водосборе, включает систему мер по обращению с отходами производства и потребления, по рекультивации объектов накоплен-

ного вреда, техногенно нарушенных земель и территорий, по организации сбора диффузного стока от различных источников хозяйственной деятельности, по очистке сточных вод. В рамках предложений по организации водоохраных мероприятий на водосборе р. Урал рассмотрены следующие источники загрязнения, характерные для этой территории: объекты горнорудной промышленности, объекты добычи и переработки общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ), объекты нефтегазовой отрасли, коммунальная сфера.

Основные и специфичные источники загрязнения для бассейна р. Урал — **объекты и предприятия горнорудной промышленности**. Негативное влияние отмечается как от действующих объектов добычи и переработки, так и от уже отработанных и заброшенных месторождений. Отвалы отработанных горных пород, затопленные карьеры, шламо- и хвостохранилища создают угрозу экологическому состоянию р. Урал и ее притоков. Необходимы мероприятия по защите окружающей среды от негативного влияния действующих промышленных разработок, ликвидация накопленного вреда и рекультивация территорий уже отработанных месторождений. К основным рекомендуемым мерам в отношении объектов горнорудной промышленности относятся следующие: инженерные методы изоляции отвалов горных пород, шламо- и хвостохранилищ от поверхностного и подземного стока; создание противодиффузионных экранов из различных защитных материалов; создание искусственных геохимических барьерных зон; нейтрализация отвалов минерализованных пород, затопленных карьеров и хвостохранилищ с использованием комплекса гидрометаллургических, химических, физических и биологических методов; меры по организации, сбору и очистке ливневого стока с территорий горного отвода и промплощадок, по обустройству территории промплощадок, включая обваловку и использование сорбента; модернизация очистных сооружений (ОС); внедрение более глубоких и современных методов очистки промышленных сточных вод от характерных ЗВ с использованием различных реагентов; применение эффективных технологий раздельной очистки шахтных, рудничных и подотвальных вод; внедрение дополнительных модулей очист-

ки; применение локальных биоинженерных сооружений; создание биоплато и биологических очистных прудов на основе высших водных растений [2, 6–10, 15, 18, 23, 25, 26]. При открытии и начале разработки новых месторождений необходимо более грамотное планирование инфраструктуры месторождений и промплощадок, проектирование защитных сооружений для исключения или минимизации диффузного загрязнения от объектов добычи.

Для снижения поступления ЗВ от объектов добычи и переработки ОПИ необходимы модернизация способов очистки сточных и фильтрационных вод карьеров, отвалов грунтов, отстойников, шламохранилищ, обваловка территорий, на которых ведется добыча, изоляция отвалов размываемых грунтов, создание систем дренажа и ливневой канализации.

В целях снижения загрязнения от объектов нефтегазовой промышленности рекомендуется изоляция шламохранилищ от речной и овражно-балочной сети; меры по перехвату, отводу и очистке поверхностного стока с загрязненных территорий, обустройство поглотителей поверхностных вод с засыпкой сорбента, рекультивация прилегающих нарушенных территорий; организация системы дренажа и ливневой канализации на территории промплощадок, применение специальных покрытий в местах возможного загрязнения почв и территории, обваловка территории промзон; модернизация ОС с применением локальных биоинженерных сооружений. В первую очередь требуются защитные меры на объектах добычи и переработки нефтегазового сырья в районе городов Орск и Оренбурга, а также на объектах переработки нефти и газа в бассейне р. Чаган. Рекомендуется создание биоплато как элемента ОС на нефтегазовых перерабатывающих предприятиях для доочистки сточных вод.

Модернизация систем очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод в первую очередь требуется на канализационных очистных сооружениях (КОС) городов Оренбурга [20, 24], Магнитогорска, Сибая, Гая, Орск, Новотроицка, Медногорска и с. Акъяр. Рекомендуется применение современных методов

очистки сточных вод: комбинированные методы физико-химической очистки, методы обратного осмоса, ионно-обменные, адсорбционные методы, реагентная очистка сточных вод совместно с биологическими методами [24]. Необходима реконструкция не справляющихся с очисткой сточных вод КОС г. Баймака и защита р. Елшанки при реконструкции КОС г. Соль-Илецка. Для снижения нагрузки на городские очистные сооружения стоит рассмотреть возможности применения локальных очистных установок на территориях городских производственных предприятий. Кроме того, необходима модернизация системы сбора и очистки ливневых вод в городах Оренбурге, Медногорске, Магнитогорске [3], Орске, Новотроицке, в том числе с применением биоплато и фитофильтров [46].

Приоритетные объекты негативного антропогенного воздействия, расположенные на водосборе, мероприятия на которых должны быть проведены в первую очередь, представлены на рис. 8.

Мероприятия в акваториях

В рамках блока мероприятий, проводимых непосредственно в акватории водных объектов, предложена реализация методов экологической реабилитации, направленных на устранение деградировавших элементов водной экосистемы, замещение утраченных или поврежденных элементов экосистемы, формирование условий, необходимых для интенсификации процессов самоочищения [37, 40]. Эта группа методов оказывает воздействие непосредственно на выбранный участок водного объекта и особенно актуальна для водных объектов, испытывающих постоянную, интенсивную и продолжительную антропогенную нагрузку, превышающую способность к самоочищению, что приводит к формированию накопленного ущерба и деградации экосистем.

Работы, выполняемые в акватории водного объекта, включают меры по активизации процессов самоочищения, а также мелиорацию загрязненных и загрязненных водных объектов по двум направлениям: очистка вод от химических и биологических загрязнений и очистка донных

Объекты негативного антропогенного воздействия на водосборе, предлагаемые для осуществления первоочередных мер

- Объекты металлургической промышленности
- Объекты металлургической промышленности РК
- ▲ Объекты нефтегазовой промышленности
- ▨ Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение
- ▲ Объекты нефтегазовой промышленности РК
- Объекты добычи и переработки ОПИ
- ✱ Реконструкция и модернизация КОС и ливневой канализации
- Участки с высоким уровнем нагрузки
- Участки с экстремально высоким уровнем нагрузки
- Граница РФ и РК

Цифрами на карте обозначены:

- 1 - Урляда и Узельга; 2 - Магнитогорское вдхр; 3 - Бузавлык
4 - Колпачка; 5 - Елшанка; 6 - Сух. Губерля; 7 - Блява
8 - Кураганка; 9 - Елшанка

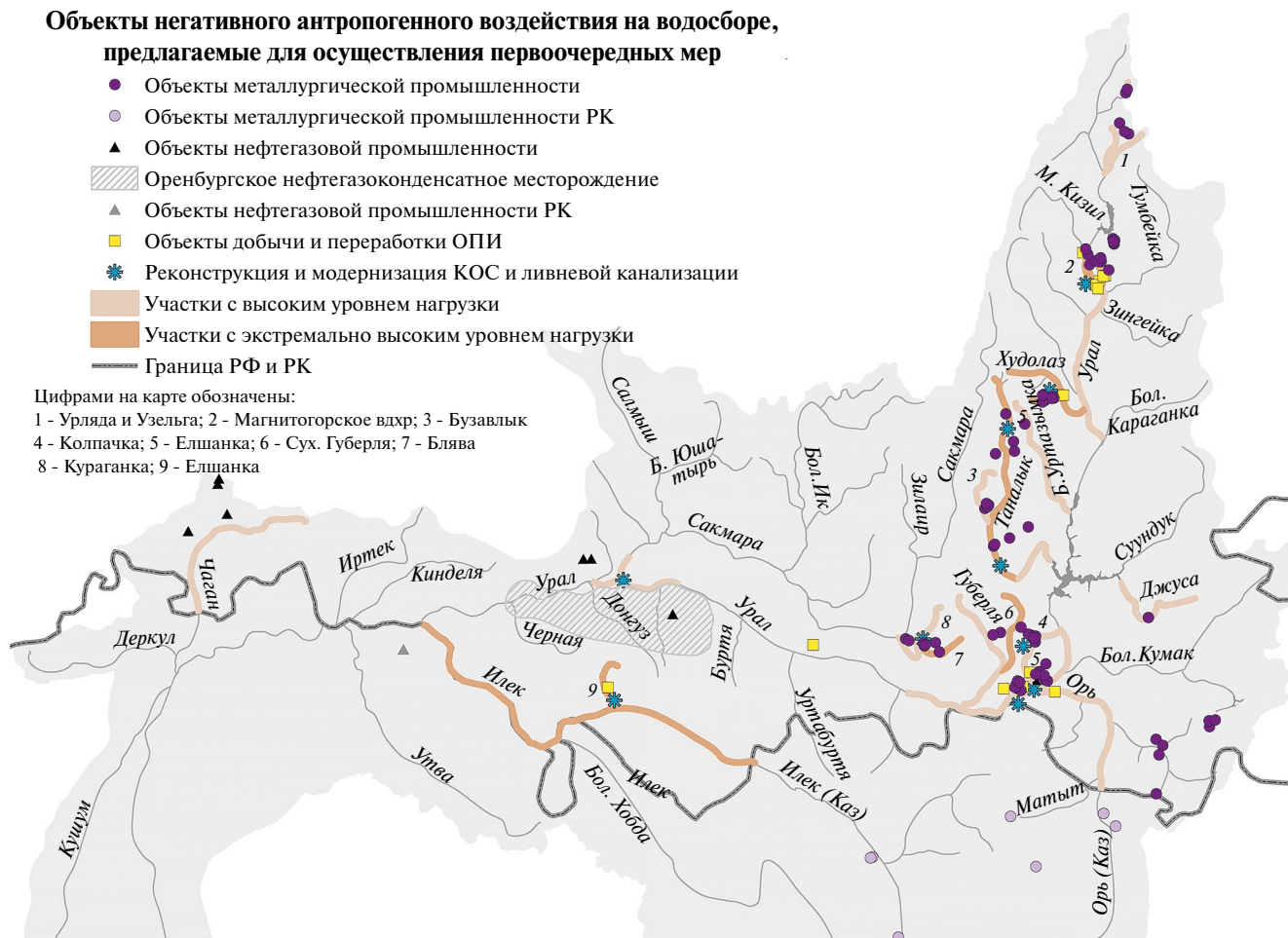


Рис. 8. Объекты антропогенного воздействия на водосборе, на которых должны быть осуществлены первоочередные мероприятия по защите и охране водных объектов.

отложений (илов) как источника вторичного загрязнения вод. На рис. 9 представлены пилотные участки водных объектов бассейна р. Урал, предлагаемые для обустройства искусственных аэраторов-перепадов в русле, для проведения работ по изъятию донных отложений, для обустройства русловых и пойменных биоплато.

Работы по изъятию загрязненных донных отложений с последующим восстановлением водных биоценозов и прибрежной растительности рекомендуется провести на участках водных объектов, где зафиксировано значительное ухудшение экологического состояния: р. Карагайлы в месте впадения в р. Худолаз, р. Таналык в п. Бурибай, р. Елшанка ниже КОС г. Соль-Илецка, р. Джерекля (приток р. Блява) у заброшенной обогатительной фабрики Блявинского рудника, р. Сухая Губерля (Гайский ГОК).

В настоящее время в отечественной и зарубежной водоохранной практике наиболее перспективной и эффективной считается группа биологических методов очистки, предполагающая создание биоплато. Биоплато представляют собой искусственно созданные водные объекты, имитирующие естественные водно-болотные угодья, болота и марши. Водные растения в биоплато выполняют фильтрационную, сорбционную, концентрационную, окислительную, детоксикационную функции [12]. Биоплато могут быть использованы в качестве эффективной меры по улучшению качества воды за счет высокой способности макрофитов поглощать различные ЗВ.

В качестве самостоятельной фильтрующей системы для очистки вод от химических и биологических загрязнений предлагается организация русловых и пойменных биоплато на следую-

Мероприятия, направленные на улучшение экологического состояния водных объектов

- ◆ Изъятие загрязненных донных отложений
- ▲ Обустройство русловых и пойменных биоплато
- Установка аэраторов-перепадов
- Участки с высоким уровнем нагрузки
- Участки с экстремально высоким уровнем нагрузки
- Граница РФ и РК

Цифрами на карте обозначены:

- 1 - Урляда и Узельга; 2 - Магнитогорское вдхр; 3 - Бузавлык
- 4 - Колпачка; 5 - Елшанка; 6 - Сух. Губерля; 7 - Блява
- 8 - Кураганка; 9 - Елшанка



Рис. 9. Пилотные участки водных объектов для проведения мероприятий по улучшению их экологического состояния, осуществляемых в акватории водных объектов.

ших пилотных участках: р. Большая Уртазымка ниже с. Сосновка, р. Джуса ниже п. Слюдяного, р. Таналык ниже впадения р. Макан, р. Худолаз в устье р. Карагайлы, р. Урал в устье р. Сухая Речка в с. Агаповка, р. Сухая Губерля в с. Ишкинино, пруд на р. Елшанке в г. Гае, система стариц и проток на правобережной пойме р. Урал в г. Орске, система озер и прудов в старице р. Урал на правобережной пойме в г. Новотроицке, старичные озера на левобережной пойме р. Урал в г. Оренбурге, система стариц на левом берегу р. Сакмары рядом с Сакмарской ТЭЦ г. Оренбурга, пойменные понижения на левом берегу р. Сакмары рядом с Оренбургской ТЭЦ г. Оренбурга. При организации биоплато для снижения концентрации ЗВ рекомендуется применять наиболее эффективные виды высшей водной растительности с учетом специфики имеющегося загрязнения [7, 26].

Мероприятия на пойменных и прибрежных территориях

Группа методов по обустройству пойменных и прибрежных территорий включает работы по восстановлению прибрежной зоны водного объекта, речных пойм, ранее отмерших стариц и проток, а также по организации водоохраных зон (ВОЗ) [32]. Такие меры позволяют предотвратить или существенно снизить антропогенную нагрузку и поступление ЗВ с прибрежных территорий, непосредственно примыкающих к рассматриваемому участку водного объекта. В бассейне р. Урал они могут служить важной составляющей защиты участков рек, протекающих в пределах городских и селитебных территорий, а также вблизи отдельно стоящих объектов хозяйственной деятельности. Высадка на поймы древесно-кустарниковой растительности мест-



Рис. 10. Пилотные участки для проведения мероприятий, направленных на обустройство пойменных и прибрежных территорий водных объектов.

ных видов, создание водно-болотных угодий и дополнительных лесопосадок обеспечит восстановление ландшафтов пойм и возможности для их дальнейшего самостоятельного развития.

В рамках данной группы методов в бассейне р. Урал предложены пилотные участки для проведения работ по организации и поддержанию режима ВОЗ, а также по восстановлению околотовальной и прибрежной растительности на участках рек, в том числе малых, в пределах населенных пунктов (рис. 10). Необходимо устранить имеющиеся в настоящее время нарушения режима ВОЗ и прибрежных защитных полос (ПЗП) в части запрета на размещение отходов производства и потребления, в том числе бытового мусора, и отвалов размываемых грунтов в целях защиты водных объектов от попадания фильтрата, насы-

щенного ЗВ. Рекомендуется также включение в природно-рекреационный городской ландшафт ВОЗ р. Блявы в г. Медногорске, р. Кураганки в г. Кувандыке, р. Елшанки в г. Орске, р. Урал в г. Оренбурге [22].

В целях поддержания экологической стабильности всей рассматриваемой территории в качестве связующего элемента различных водоохранных мероприятий рекомендуется разработать и реализовать проект реконструкции экологического каркаса речного водосбора (ЭКВ) р. Урал, опираясь на имеющийся опыт разработки природно-экологического каркаса Оренбургской области [39]. ВОЗ и ПЗП водных объектов должны стать опорной осью ЭКВ, а пойменные массивы р. Урал — одной из его ключевых частей.

Предложенные комплексные водоохранные меры направлены на восстановление природной среды и водных экосистем, улучшение условий обитания гидробионтов, улучшение качества вод, обеспечение пригодности водных объектов для биоты и хозяйственных целей, а также качественной природной среды для человека.

ВЫВОДЫ

Проведенное комплексное исследование позволяет сфокусировать внимание на определенных экологических проблемах российской части бассейна р. Урал, выявить наиболее уязвимые участки бассейна. Предложенное ранжирование водных объектов может быть полезно при выявлении первоочередных и второстепенных задач планирования водоохранных мероприятий, что особенно актуально для трансграничного бассейна. Для пилотных участков предложен набор мер комплексного и последовательного решения проблемы неблагоприятного экологического состояния водных объектов на всех звеньях, начиная с областей формирования стока и заканчивая непосредственно участками русел и акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 16.06.2023)
2. Аллаярова Г.Р., Мусабиров Д.Э., Зеленковская Е.Е., Афонькина С.Р., Назарова Л.Ш., Даукаев Р.А. Оценка загрязнения вредными веществами поверхностных и питьевых вод горнорудного района // Гигиена, экология и риски здоровью в современных условиях. Мат-лы XI межрегиональной научн.-практ. конф. Саратов, 2021. С. 14–16.
3. Алферов И.Н., Яковенко Н.В. Актуальные вопросы оценки экологического ущерба от загрязнения водных объектов в вододефицитном регионе // Вестн. Балтийского федерального ун-та. 2015. № 7. С. 129–136.
4. Артамонова С.В., Калиев А.Ж. Геоэкологическая оценка качества водоисточников, расположенных в зоне Гайского обогатительного комбината // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2017. № 6 (68). С. 210–212.
5. Атаманова О.В., Тихомирова Е.И., Бурахта В.А., Байтлесова Л.И., Джубаялиева А.К. Гидрохимический мониторинг качества воды природных водоемов Уральского речного бассейна // Поволжский экол. журн. 2021. № 3. С. 358–368.
6. Бактыбаева З.Б., Сулейманов Р.А., Ямалов С.М., Кулагин А.А., Валеев Т.К., Рахматуллин Н.Р. Оценка содержания и миграции тяжелых металлов в компонентах речных экосистем горнорудных территорий Республики Башкортостан // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 9. С. 822–827.
7. Бактыбаева З.Б., Суюндуков Я.Т., Ямалов С.М., Юнусбаев У.Б. Загрязнение тяжелыми металлами экосистемы реки Таналык, сообщества водных макрофитов и возможности их использования для биологической очистки. Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. 208 с.
8. Боброва З.М., Ильина О.Ю. Воздействие предприятий на состояние воды реки Урал в пределах города Магнитогорска // Теория и технология металлургического производства. 2011. № 11. С. 159–161.
9. Боброва З.М., Ильина О.Ю. Оценка состояния воды в реке Урал // Теория и технология металлургического производства. 2010. № 10. С. 165–170.
10. Вараева Е.А., Аксенов В.И. Технология очистки сточных вод горно-обогатительных комбинатов // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 98–106.
11. Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. М.: Госкомгидромет СССР, 1986. № 250–1163. 6 с.
12. Высоцкий С.П., Ермакова Д.И., Степаненко Т.И. Очистка сточных вод от тяжелых металлов // Науч. вестн. НИИГД Респиратор. 2017. № 2 (54). С. 69–77.
13. Галеева Э.М., Рашитова Л.Н. Особенности гидрохимического состава поверхностных водных объектов Башкирского Зауралья // Астраханский вестн. экол. образования. 2018. № 1 (43). С. 154–164.
14. Гареев А.М., Белан Л.Н., Горячев В.С., Фархутдинов А.М., Барышев В.И., Шевченко А.М., Островская Ю.В., Ахмедьянов Д.И. основные характеристики трансформации гидролого-экологических условий в малых реках в зоне влияния объектов горнодобывающей отрасли (на примере рек Карагайлы и Худолаз в бассейне реки Урал) // Вестн. Акад. наук Республики Башкортостан. 2021. Т. 39. № 2 (102). С. 49–57.
15. Глазунова И.В., Ромащенко А.К., Тишина К.А. Биотехнологические сооружения и накопители местного стока водосборов для наиболее эффективного использования водных ресурсов речных бассейнов // Природообустройство. 2018. № 2. С. 46–54.

16. Государственный доклад Правительства Оренбургской области “О состоянии и об охране окружающей среды Оренбургской области” за 2011–2021 гг. Оренбург, 2012–2022 гг.
17. Государственный доклад Министерства природопользования и экологии Республики Башкортостан “О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан” за 2011–2021 гг. Уфа, 2012–2022 гг.
18. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Под ред. *В.И. Данилова-Данильяна*. М.: РАН, 2020. 512 с.
19. Доклад Министерства экологии Челябинской области “Об экологической ситуации в Челябинской области” за 2015–2021 гг. Челябинск, 2016–2022 гг.
20. *Евстифеева Т.А., Глуховская М.Ю.* Анализ качества воды р. Урал в границах г. Оренбург // Современные науч. исследования и инновации. 2020. № 1 (105). С. 57.
21. Ежегодник “Качество поверхностных вод Российской Федерации” с Приложением. За 2015–2021 гг. Ростов-на-Дону: ГХИ, 2016–2022.
22. *Емельянова Е.К., Горошко Н.В.* Ретроспектива экологической проблемы приречных пространств малых рек в городской черте Новосибирска // Электронный науч.-метод. журн. Омского ГАУ. 2018. № 4 (15) октябрь–декабрь. [http:// e-journal. omgau. ru/ images/ issues/ 2018/ 4/ 00640. pdf](http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2018/4/00640.pdf).
23. *Исакулов Б.Р., Сарсенов А.М.* Загрязнение рек бассейна Каспийского моря промышленными отходами и пути его решения // Геология, география и глобальная энергия. 2011. № 4 (43). С. 136–141.
24. *Князева А.Н.* Антропогенное загрязнение поверхностных вод реки Урал биогенными элементами как экологическая проблема региона // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Оренбург: Министерство образования и науки РФ, Оренбургский гос. ун-т, 2018. С. 998–1001.
25. *Макарова Н.М., Рогачев А.Ф.* Предупреждение поступления поверхностных вод с территории площадных и точечных источников загрязнения // Природообустройство. 2021. № 5. С. 37–43.
26. *Мустафин А.Г., Сабитова З.Ш., Шарипов Т.В.* Экологические проблемы горнорудного региона Башкирского Зауралья и пути их решения // Вестн. Башкирского ун-та. 2011. Т. 16. № 1. С. 43–46.
27. *Мухамедьярова Л.Г., Янбердина Л.А., Хайруллина Д.Г.* Интегральная оценка экологического состояния р. Таналык Республики Башкортостан // Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки. Сб. статей Международ. науч.-практ. конф. 2017. Ч. 6. С. 9–11.
28. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2011–2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг. Астана: Министерство энергетики Республики Казахстан, 2015–2022.
29. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. М.: Минсельхоз РФ, 2020. № 552.
30. *Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т.* Формирование качества поверхностных вод бассейна верхнего течения реки Урал в условиях техногенной трансформации природной среды // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 456–467.
31. *Попов А.Н., Оболдина Г.А., Прохорова Н.Б.* Концептуальные основы реабилитации поверхностных водных объектов // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 4–17.
32. Природоприближенное восстановление и эксплуатация водных объектов / Под ред. *И.С. Румянцев*. М.: МГУП, 2001. 285 с.
33. РД 52.24.643–2002 Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 21 с.
34. СанПиН 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021.
35. *Сергалиев Н.Х., Ахмеденов К.М., Чибилев А.А., Петрищев В.П., Сивохин Ж.Т., Абишева С.Х., Гаврилина И.И.* Проблемы трансграничного переноса загрязняющих веществ в бассейне реки Жайык // Малые реки Казахстанско-Оренбургского трансграничного региона. Уральск: Западно-Казахстанский ун-т, 2015. С. 162–172.
36. *Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М.* Трансформация качественного состава речной воды в условиях горнопромышленного природопользования // Теоретические проблемы экологии и эволюции. Качество воды и водные биоресурсы. 2020. С. 172–176.
37. *Сметанин В.И.* Методы и технологии рекультивации и восстановления водных объектов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: Моск. гос. ун-т природообустройства, 2000. 47 с.

38. Соловых Г.Н., Шостак Е.И., Осинкина Т.В. Кадмий и свинец в илах реки Урал: валовое содержание и распределение // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и техн. науки. 2020. № 8. С. 25–30.
39. Чибилев А.А., Мелешкин Д.С., Григорьевский Д.В. Современное состояние природно-экологического каркаса бассейна реки Урал в пределах Оренбургской области и его роль в социально-экономическом развитии региона // Успехи современного естествознания. 2017. № 8. С. 122–127.
40. Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В. Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочищения и оптимизация водоотведения. М.: РАСХН, 2011. 388 с.
41. Янтурин С.И., Хисаметдинова А.Ю., Бускунова Г.Г. Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах малых рек западного склона хребта Ирандек // Самарский науч. вестн. 2021. Т. 10. № 2. С. 131–135.
42. Palmer M.A., Hondula K.L., Koch B.J. Ecological Restoration of Streams and Rivers: Shifting Strategies and Shifting Goals // Annual Rev. Ecol. Evolution Systematics. 2014. 45 (1). P. 247–269.
43. Schmutz S., Sendzimir J. Riverine Ecosystem Management: Science for Governing Towards a Sustainable Future. 2018.
DOI: 10.1007/978-3-319-73250-3
44. Speed R., Li Y., Tickner D., Huang H., Naiman R., Cao J., Lei G., Yu L., Sayers P., Zhao Z., Yu W. River Restoration: A Strategic Approach to Planning and Management. Paris: UNESCO, 2016.
45. Timothy J. Beechie, David A. Sear, Julian D. Olden, George R. Pess, John M. Buffington, Hamish Moir, Philip Roni, Michael M. Pollock. Process-based Principles for Restoring River Ecosystems // BioSci. 2010. V. 60. Iss. 3. March. P. 209–222.
46. Vijayaraghavan K., Biswal B.K., Adam M.G., Soh S.H., Tsen-Tieng D.L., Davis A.P. Balasubramanian R. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects // J. Environ. Management. 2021. 292 (2021) 112766.
doi:10.1016/j.jenvman.2021.112766

STUDYING THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF WATER OBJECTS IN THE URAL RIVER BASIN AND MEASURES FOR ITS IMPROVEMENT

G. S. Ermakova^{a, b, *}, I. Yu. Milyutina^{a, b}, A. A. Strokov^{a, b}, G. Sh. Tursunova^{a, b}, I. V. Zemlyanov^{a, b}

^a Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet, Moscow, 119034 Russia

^b Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: ermakova_gs@mail.ru

Integral estimate of the environmental conditions of water bodies in the Russian part of the Ural River basin is presented. The estimate is based on the data of long-term state water quality monitoring, statistical data, remote sensing data, the results of special researches, and data of the authors' field studies of water bodies and drainage areas, as well as laboratory studies of water samples. The collected materials were used to characterize the current environmental conditions of water objects and the spatial heterogeneity in the economic development of the drainage area. All available data were used to compile a catalog of water bodies ranked by the level of the load on them. For water bodies experiencing the largest load and characterized by significant violations of water quality standards, a system of measures is proposed for improving their environmental conditions. The choice of the measures is based on the analysis of the Russian and foreign experience in water protection activities, including nature-based restoration technologies of water bodies. The proposals have a comprehensive character and are based on a basin-scale approach.

Keywords: the Ural River, water quality, pollution level, ecological conditions, anthropogenic load, measures for water bodies.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОДОСБОРНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕКИ УРАЛ¹

© 2024 г. Ж. Т. Сивохип*, В. М. Павлейчик, А. А. Чибилёв

Институт степи УрО РАН, Оренбург, 460000 Россия

**e-mail: sivohip@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 15.03.2024 г.

На основе картографического анализа антропогенно-трансформированных территорий в пределах бассейна р. Урал выявлены особенности их пространственной неоднородности. Учтены показатели распределения и многолетней динамики развития основных видов природопользования, системы расселения, объектов транспортной инфраструктуры и крупных промышленных предприятий. Выявлено, что основная причина пространственного распространения различных видов хозяйственной деятельности — различия в природно-ресурсном потенциале, обусловленные широтно-зональным и геолого-геоморфологическим разнообразием ландшафтов водосборной территории. Установлено, что наиболее трансформированы территории вдоль долины р. Урал, что обусловлено сложившейся системой расселения и наличием гарантированных запасов водных ресурсов. Важный фактор трансформации водосборной территории р. Урал — горнодобывающая отрасль, формирующая крупные промышленные агломерации и выступающая в роли основного источника поступления загрязняющих веществ в речную воду.

Ключевые слова: антропогенная трансформация, стокоформирующий потенциал, широтно-зональные условия, природопользование, регламентация хозяйственной деятельности.

DOI: 10.31857/S0321059624050085 **EDN:** VXMSHU

ВВЕДЕНИЕ

Трансформация гидрологического режима рек обусловлена постоянными изменениями составляющих водного баланса и параметров внешней среды, в первую очередь антропогенным преобразованием поверхности водосбора. Сочетание данных факторов непосредственно влияет на гидрологическую функцию ландшафтов, т. е. на процесс поступления воды в речную сеть с единицы площади и формируемое качество водных ресурсов.

Относительно небольшие объемы ресурсов речного стока степной зоны и их высокая временная изменчивость во многом определяют специфику хозяйственного освоения территорий. В то же время развитие систем расселения и хозяйства зачастую приводит к серьезным противоречиям между устойчивым социально-

экономическим развитием территорий и сохранением экологического благополучия водных экосистем. Хозяйственная деятельность на водосборах рек непосредственно влияет на параметры геостока (по С.Д. Муравейскому), представляющего совокупность стока воды, наносов, химических веществ, биологических субстратов, тепла, отражающая условия формирования стока и его перемещения по русловой сети [9]. На современном этапе острой и нерешенной проблемой остается оценка диффузного загрязнения рек и водоемов, пространственная специфика которого непосредственно зависит от структуры использования земель на водосборах [10].

Формирующиеся в бассейнах рек типы природопользования, как правило, основаны на природно-ресурсном потенциале территорий. Бассейн р. Урал характеризуется неоднородным распределением природных ресурсов, что обусловлено широтной и высотной зональностью ландшафтов в сочетании с расположением бассейна в пределах распространения различных геолого-тектонических и геоморфологических

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания (тема “Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем”, AAAA–A21–121011190016–1).

структур. Смена широтно-зональных условий — главная причина дифференциации фоновых типов природопользования, в первую очередь — сельскохозяйственного. В рассматриваемом бассейне наблюдается смена природных зон от горнолесной и лесостепной в верховьях до северных пустынь в нижнем течении реки. Соответственно, изменяется потенциал используемых ресурсов (климатических, земельных и почвенных, растительных, лесных, водных и др.), а в конечном итоге — характер и степень антропогенной трансформации ландшафтов.

Бассейн р. Урал расположен в пределах двух геолого-тектонических мегаструктур — Восточно-Европейской равнины и Уральской горной страны. Каждая из этих структур довольно неоднородна в плане рельефа — в равнинной части выделяются юго-восточная окраина Волго-Уральского междуречья, Прикаспийская низменность и Предуральский прогиб, в горной — система осевых и вторичных хребтов горного Урала и равнинные пенеплены Зауралья. Перечисленным мега- и мезоструктурам соответствует определенное сочетание минеральных ресурсов, разработка которых сопровождается специфичными трансформационными процессами. Для западной равнинной части бассейна — это преимущественно добыча углеводородного сырья, для восточной — разработка рудных полезных ископаемых и месторождений природных строительных материалов. Как правило, в непосредственной близости от мест добычи функционируют предприятия по их переработке. Формирующиеся природно-техногенные комплексы, хотя и занимают относительно небольшие площади, вносят заметный вклад в преобразование условий формирования речного стока.

В ходе исследования авторы исходили из того, что любой вид антропогенной трансформации природных ландшафтов приводит к изменениям естественных условий формирования стока, ухудшению качества водных ресурсов и многим другим негативным эколого-гидрологическим последствиям. Антропогенное воздействие на водосборные территории имеет комплексный характер: а) трансформация условий формирования поверхностного стока (изменение свойств растительного покрова и грунтов) и инфильтра-

ции воды; б) механическое изменение условий плоскостного и линейного стока; в) загрязнение воды, грунта, воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование пространственной трансформации поверхности водосбора р. Урал выполнено посредством разработки серии тематических геоинформационных слоев, выражающих основные виды антропогенного воздействия на природные ландшафты. В ходе подготовки картографического материала собраны и систематизированы сведения о пространственном распределении объектов хозяйственной инфраструктуры — пахотных угодий, участков лесозаготовок, населенных пунктов, автомобильных и железных дорог, крупных промышленных предприятий, водохранилищ и др. Полученные геопространственные (площадные, линейные, локальные) данные унифицированы в показатели плотности для понимания наиболее общих географических принципов распределения. Далее был выполнен перерасчет значений каждого из показателей применительно к частным водосборам бассейна р. Урал.

Особенности многолетней динамики отдельных показателей (площадь пахотных угодий, численность поголовья скота и др.) проанализированы по официальным данным органов статистики [5, 6]. По открытым данным, подготовленным лабораторией GLAD университета Мэриленда [11, 13], в программной среде QGIS рассчитаны показатели распаханности и лесопокрывности водосборов бассейна р. Урал и их изменения за периоды 2003–2019 гг. и 2000–2020 гг. соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итогом анализа пространственных особенностей хозяйственного освоения территории бассейна р. Урал стало картографирование основных типов природопользования, влияющих на трансформацию ландшафтов водосборных территорий (рис. 1).

Доминирующее развитие сельского хозяйства отражает зональные особенности степных ланд-

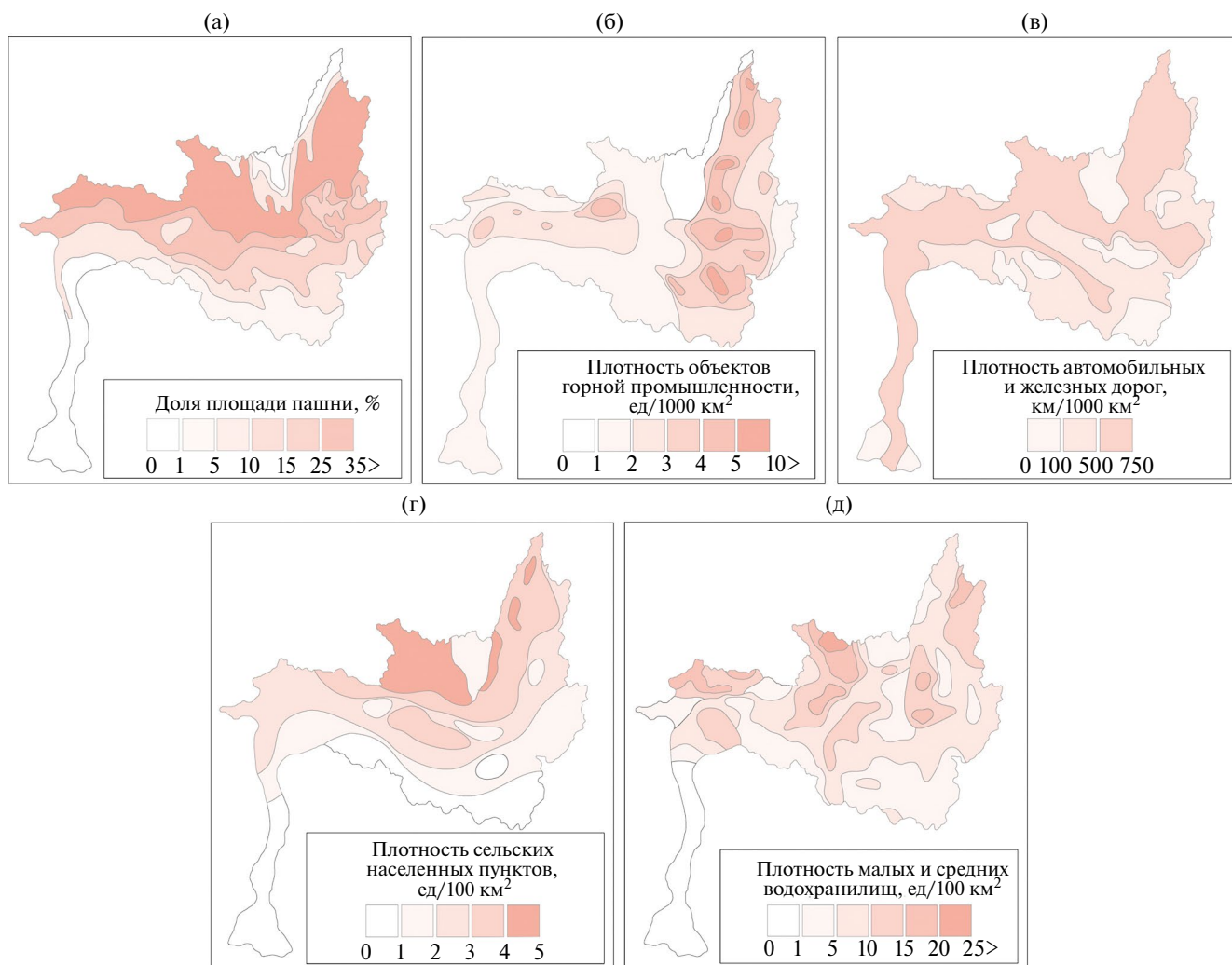


Рис. 1. Пространственное распределение основных факторов антропогенной трансформации ландшафтов бассейна р. Урал: а – фоновые типы природопользования (земледелие); б – объекты горнопромышленной отрасли; в – транспортная инфраструктура; г – система расселения сельского населения; д – регулирование стока.

шафтов и относится к отраслям, территориально широко использующим естественные ресурсы [7]. Развитие растениеводства в определенных районах связано как с их благоприятными агроклиматическими условиями, так и с ресурсным потенциалом черноземных почв, развитых в условиях лесостепи, северных и средних степей (рис. 1а). Характерной особенностью развития земледелия в бассейне р. Урал стало вовлечение в пахотный оборот крупных массивов малопродуктивных почв в период целинной кампании (1954–1965 гг.). В постсоветский период возделывание именно этой части пахотных угодий было прекращено в первую очередь, в связи с чем в пределах рассматриваемого бассейна образовались обширные площади неиспользуемых залежных земель.

Выявлено, что на большинстве водосборов за рассматриваемый временной период наблюдалось сокращение пахотных угодий как по показателю распаханности (доля пашни относительно площади водосбора), так и по показателю изменения площади пашни за период 2003–2019 гг. (рис. 2а, 2б). В среднем распаханность сократилась на $\leq 10\%$, превышения этой величины отмечены лишь на водосборах некоторых левобережных притоков р. Урал (Бердянка, Донгуз, Уртабуртя и Буртя) и в верхнем течении рассматриваемого бассейна – водосборы рек Сакмары (до Сакмарского водохранилища), Янгельки, Зингейки и Таналык. Рост площади пашни к 2019 г. зафиксирован на водосборах с ее долей $> 50\%$ площади водосбора. Это некоторые правобережные притоки на южных склонах

возвышенности Общий Сырт (Кинделя, Иртек, Елтышовка), возвышенностях Предуралья (Салмыш, нижнее течение Сакмары, Юшатырь, Накас, Ташла), а также в Зауралье (Суундук).

Особенности пространственного распределения гидротехнических объектов, регулирующих речной сток и созданных для обеспечения нужд промыш-

ленности, коммунального хозяйства и сельскохозяйственного производства, рассмотрены в [8], где приведена обобщающая схема распределения малых водохранилищ и прудов, преимущественно сельскохозяйственного назначения (рис. 1д).

Таким образом, в пределах бассейна р. Урал сформировалась относительно устойчивая си-

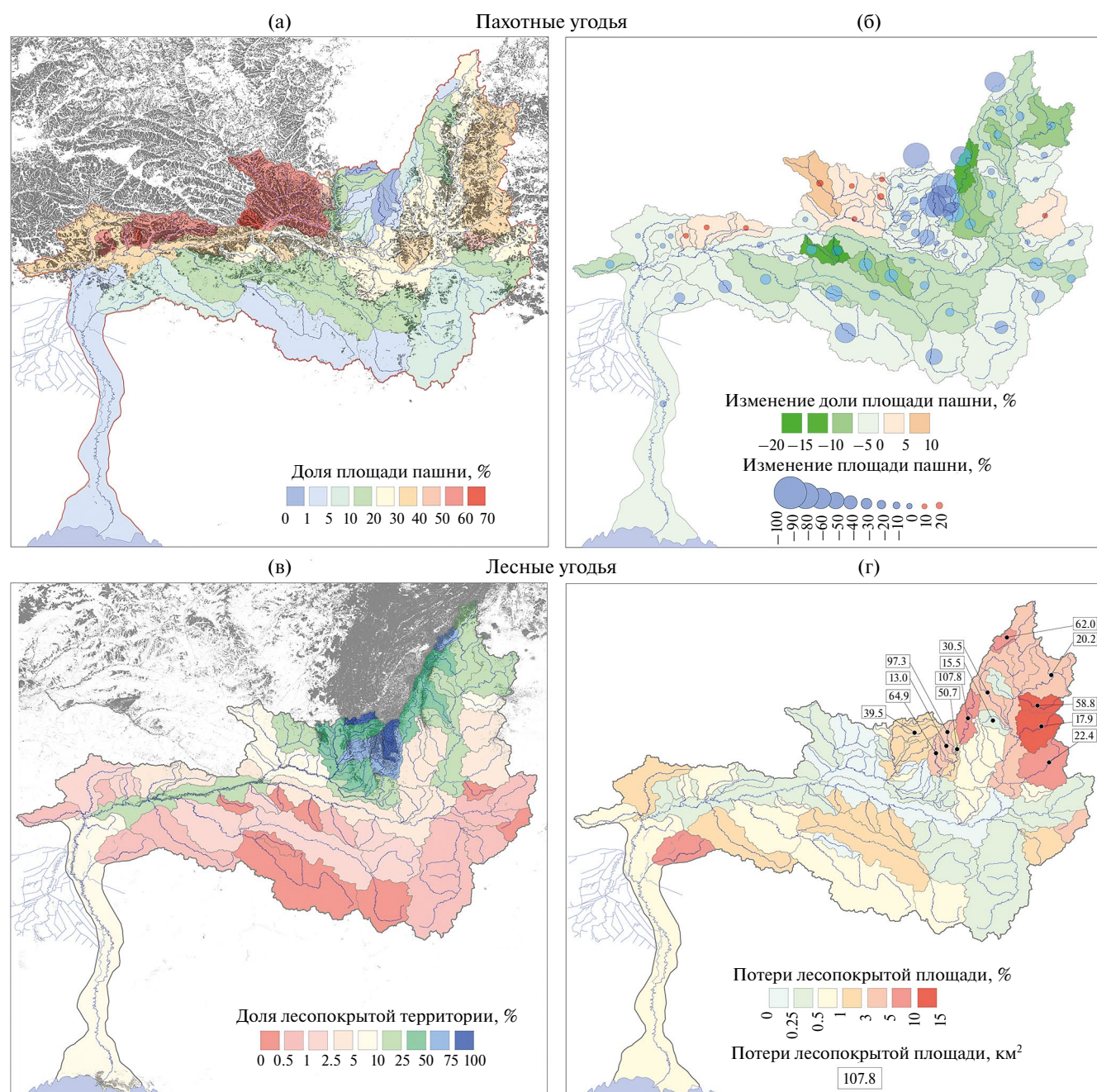


Рис. 2. Показатели фоновых видов природопользования и их многолетняя динамика в водосборах бассейна р. Урал: а — доля пахотных угодий; б — изменение доли и площади пашни за 2003–2019 гг.; в — доля лесопокрываемой территории; г — распределение потерь лесного покрова за 2000–2020 гг.

стема фонового природопользования, основанная на принципе максимально возможного аграрного освоения пространства степной зоны. В связи с этим приобретает особую актуальность проблема регламентации сельскохозяйственной нагрузки на водосборные территории. При этом очень важно оценить характер неорошаемого земледелия и степень его влияния на характеристики речного стока. В целом считается, что агротехнические и агролесомелиоративные мероприятия в засушливых районах уменьшают склоновый и речной сток. При подобных оценках необходимо учитывать механизмы саморегулирования гидрологических систем, особенно в условиях хозяйственной деятельности. Например, введение зяблевой пахоты, приведшей к уменьшению поверхностного склонового стока, может быть частично компенсировано за счет увеличения его подземной составляющей [1].

Лесопокрытые территории – важный фактор, определяющий условия формирования речного стока и выполняющий водоохраные функции в исследуемом бассейне. Проведенные в QGIS расчеты позволили выявить закономерности пространственного распределения лесопокрытой площади и потери за многолетний период (рис. 2в, 2г). Выявлено, что максимальные потери леса обусловлены природными пожарами, характерными для степных и лесостепных районов Зауралья и затрагивающими островные массивы сосны и редколесья в бассейнах рек Большая Караганка, Зингейки, Суундук и др. В горнолесной части уральского бассейна (водосборы рек Миндяк, Зилаир, Крепостной Зилаир и Баракал, верховья Сакмары) главным фактором потерь становится лесохозяйственная деятельность. На фоне гораздо большей лесопокрытости этой части бассейна повсеместно распространенные вырубки приводят к потере 3–10% леса за последние два десятилетия, что заметно меньше, чем потери от пирогенного воздействия в лесах Зауралья.

Лесная промышленность на территории бассейна р. Урал сосредоточена исключительно в низкогорных районах Южного Урала (центральная часть и северо-восточная окраина Зилаирского плато, хребты Ирэндык и Уралтау). Спутниковые снимки высокого пространственного

разрешения и результаты полевого обследования отдельных мест вырубок свидетельствуют о преобладании стихийного зарастания участков. Практикуются как сплошные (в пределах выдела), так и выборочные рубки наиболее старовозрастных насаждений сосны. В районах лесодобычи повсеместно наблюдаются негативные экологические последствия – лесовозные дороги (уничтожение почвенного и растительного покрова, активизация эрозионных процессов), захламление вырубок древесными остатками, сжигание некондиционного древесного материала.

Необходимо учитывать, что именно горнолесные районы имеют наиболее важное значение для формирования речного стока р. Урал и ее притоков. Бесконтрольная лесохозяйственная деятельность спровоцирует негативные трансформации в стоке р. Сакмары и ее притоков, верхней части водосбора р. Урал и ее правобережных притоков (рек Большой Кизил, Малый Кизил, Миндяк, Янгелька и др.).

Для большей части уральского бассейна, не представляющей лесохозяйственной ценности, именно пирогенный фактор стал одной из главных причин сокращения площади лесов. Наибольшую угрозу представляют пожары для массивов островных сосновых и смешанных лесов Зауралья, произрастающих в окружении пирогенно-опасных степных пространств. В целом пожары губительны для искусственных лесонасаждений, тогда как естественные места древостоя показывают относительно хорошие восстановительные качества. По глобальному архиву данных [14], территория бассейна р. Урал потеряла 6.3 тыс. га древесного покрова из-за пожаров и 40.6 тыс. га из-за всех других причин потерь. Максимальные потери (1.58 тыс. га) древесного покрова зафиксированы в 2022 г. Масштабы потерь и прироста древостоя [12] примерно сопоставимы, что свидетельствует об отсутствии принципиальных изменений в лесопокрытой площади в последние два десятилетия.

К ведущим факторам динамики качественных показателей состояния водных ресурсов относится горнопромышленное освоение водосборных территорий (рис. 1б). Анализ территориального распределения техногенных объектов

и очагов загрязнения подтверждает закономерность расположения промышленных объектов относительно источников водных ресурсов. Наиболее крупные предприятия и важные транспортные коммуникации находятся в непосредственной близости от крупных водотоков — рек Урал, Ори, Илек, Сакмары и др. Подобное их положение определяет как неблагоприятное эколого-геохимическое состояние приречных участков бассейна и непосредственно водотоков, так и значительное повышение рисков возникновения чрезвычайных ситуаций.

Расположение предприятий горнодобывающей и металлургической отраслей в верхнем гидрографическом секторе бассейна р. Урал приводит к сложной эколого-гидрологической ситуации. Снижение концентрации загрязняющих веществ в воде р. Урал происходит в крупных (Верхнеуральское, Магнитогорское и Ириклинское) водохранилищах за счет их осаждения в донных отложениях и илах в условиях слабопроточного режима. Ниже Ириклинского водохранилища происходит дополнительное снижение концентраций загрязняющих веществ за счет разбавления водой рек Большой Кумак и Ори, а ниже Орско-Новотроицкого промышленного узла — за счет их осаждения по причине чередования слабопроточных плесов и галечных перекатов, характерного для участка пересечения долиной р. Урал возвышенного пенеплена (Саринского плато) [3].

Селитебные территории как элемент системы освоения пространства играют важную роль в антропогенном преобразовании водосборной территории р. Урал (рис. 1г). К настоящему времени в бассейне р. Урал сформирована линейно-узловая система расселения с основными осями вдоль долины р. Урал. Региональная особенность размещения здесь населения — территориальная диспропорция, проявляющаяся в уменьшении плотности населения в южном и юго-восточном направлениях.

Несмотря на то, что большая часть населения исследуемого бассейна проживает в городах, существенное значение для селитебного освоения имеет именно сельское население. Максимальное количество сельских поселений в долине

р. Урал — в Оренбургской и Западно-Казахстанской областях. В Оренбургской области распространены села с численностью населения до 500 чел.; в Западно-Казахстанской области преобладают крупные сельские поселения (1000–2000 человек и более). Укрупнение сельских поселений на территории бассейна р. Урал в нижнем течении связано с ключевой ролью придолинных участков в формировании региональных систем расселения на фоне ландшафтов сухих степей и полупустынь. В российской части исследуемого бассейна, наоборот, преобладает разукрупнение сельских населенных пунктов, что подтверждают результаты исследования многолетней динамики людности. Важное следствие этих процессов — изменение территориальной организации фонового природопользования. Формируются, с одной стороны, ареалы интенсивной сельскохозяйственной деятельности, с другой — обширные массивы малоиспользуемых угодий.

Освоение территории предполагает развитие транспортной инфраструктуры, линейных объектов (автомобильные и железные дороги, трубопроводы, линии электропередач), которые формируют транспортные техногеосистемы (рис. 1в). Для магистральных дорог в исследуе-

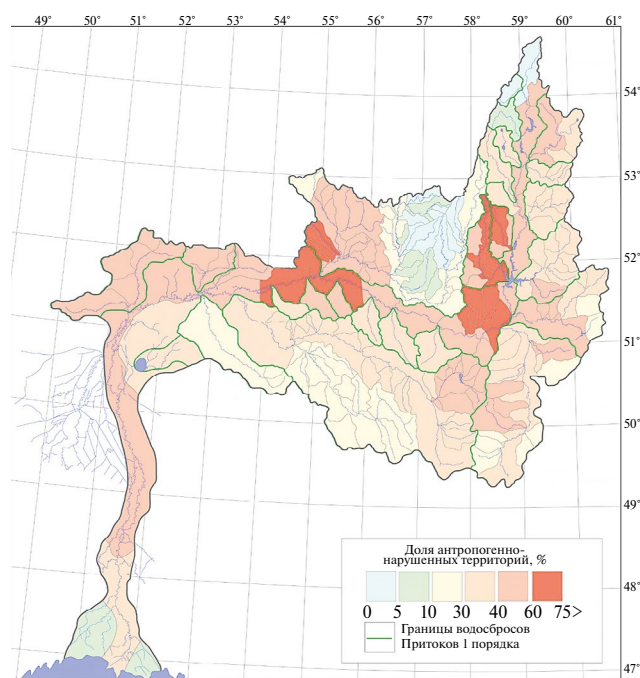


Рис. 3. Доля антропогенно-нарушенных территорий в бассейне р. Урал.

мом бассейне характерная черта — пролегание значительной их части по террасам и прилегающим (прибровочным) частям коренных склонов (реки Урал, Сакмара, Илек, Большой Ик и др.) [4]. Их влияние на компоненты ландшафтов водосборной территории р. Урал проявляется в формировании линейно-площадных очагов загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами, трансформации (изменение направления и подпор) поверхностного стока и др.

Результат пространственного анализа факторов антропогенного преобразования природных ландшафтов в бассейне р. Урал — разработка комплексной схемы, отражающей совокупную долю измененных территорий в водосборах (рис. 3). Заметим, что пространственное распределение антропогенно-трансформированных территорий в пределах бассейнов рек может быть как довольно однородным (характерно для водосборов с исключительно сельскохозяйственным использованием земель), так и резко дифференцированным. Наиболее частая причина неоднородности геоэкологической обстановки в границах частных водосборов — смена ландшафтно-геоморфологических условий и тесно связанных с ними типов природопользования от верховий к низовьям рек. Наиболее показательна подобная ситуация складывается в бассейнах рек, берущих начало в слабоосвоенных низкогорьях Южного Урала (Малый и Большой Кизил, Янгелька, Худолаз, Таналык и др.) и до впадения в р. Урал.

Исходя из полученной схемы очевидны общие закономерности дифференциации водосборов по степени антропогенной преобразованности ландшафтов. Крупный участок бассейна р. Урал с минимальной долей (до 10%) нарушенных территорий соотносится с низкогорьями, платообразными и эрозионно-расчлененными равнинами Южного Урала. В первую очередь это Зилаирское плато и расчлененные окраины — водосборные территории р. Сакмары с притоком р. Большой Ик. С юга к нему примыкают Саринское плато и его слабоосвоенные эрозионно-мелкосопочные окраины на участке долины прорыва р. Урал, являющиеся важным элементом ландшафтно-экологического каркаса степной зоны (р. Губерля и др.). Восточный

склон горного Урала в бассейне р. Урал занимает относительно узкую полосу отрогов хребтов Урал-тау и Ирендык-Крыктытау. Здесь расположены верховье р. Урал и область питания всех правобережных притоков (Малый Кизил, Большой Кизил, Янгелька, Большая Уртазымка и др.). Данный участок характеризуется высоким стокоформирующим потенциалом. К водосборным территориям со слабо трансформированными ландшафтами и невысоким стокоформирующим потенциалом относятся бассейны рек Хобды, Утвы, Ори, Суундук и др.

Водосборы рек с максимальной долей (60–75% и более) трансформированных ландшафтов располагаются в районах крупных промышленных и урбанизированных агломераций, хорошо связанных транспортной (внутренней и транзитной) инфраструктурой. Кроме того, высокая доля антропогенно-нарушенных ландшафтов прослеживается на всем протяжении долины главной реки, что обусловлено наличием гарантированных источников пресной воды и сопутствующим развитием отраслей фонового (сельскохозяйственного) природопользования.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Территория бассейна р. Урал характеризуется преобладанием трансформированных ландшафтов, включающих крупные массивы пахотных угодий и антропогенно-нарушенные участки в пределах горнопромышленных районов и селитебных территорий. Актуальность исследования пространственных закономерностей антропогенной трансформации в пределах трансграничного бассейна р. Урал определяется необходимостью поиска эффективных решений задач комплексного использования водных ресурсов и управления ими на основе рационального использования природно-хозяйственного потенциала водосборных территорий.

Очевидно, что сформировавшаяся в бассейне р. Урал система отдельных видов природопользования и расселения не может быть каким-либо образом кардинально преобразована в природоохранных целях. Вместе с тем в качестве реальных первоочередных мероприятий, направленных на снижение антропогенной нагрузки, улучшение

условий формирования стока и качества воды, необходимо рассматривать следующие:

оптимизация структуры земельных угодий с полным прекращением освоения пахотных земель в водоохранных зонах, поймах рек, элементах овражно-балочной сети, на склонах с уклоном $>4^\circ$;

– сокращение водоемкости сельскохозяйственного производства, в том числе с применением природоподобных технологий в земледелии;

– проведение регулярной экологической паспортизации горнопромышленных объектов и расширение сети государственного экологического мониторинга;

– проведение комплексных исследований на крупных водохранилищах на предмет выявления объемов накопленных загрязняющих веществ;

– разработка плана мероприятий поэтапной экологической рекультивации земель, нарушенных горными разработками и нефтегазодобычей, с приведением их в экологически безопасное состояние.

Реализация указанных мероприятий позволит существенно улучшить эколого-гидрологическую обстановку в бассейне р. Урал. Актуальными остаются комплексные исследования, связанные с оценкой антропогенного воздействия отдельных типов природопользования на условия формирования речного стока в исследуемом бассейне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коронкевич Н.И.* Некоторые направления географо-гидрологических исследований // Географические направления в гидрологии. М.: ИГ РАН, 1995. С. 30–48.
2. *Нефедова Т.Г.* Основные тенденции изменения социально-экономического пространства сельской России // Изв. РАН. Сер. географическая. 2012. № 3. С. 5–21.
3. *Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т.* Формирование качества поверхностных вод бассейна верхнего течения реки Урал в условиях техногенной трансформации природной среды // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 456–467.
4. *Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т., Падалко Ю.А.* Динамика русловых процессов в среднем течении реки Урала и риски природопользования // Изв. РАН. Сер. географическая. 2018. № 5. С. 37–45. DOI:10.1134/S2587556618050126
5. Регионы Казахстана в 2020 году. Стат. ежегодник. Нур-Султан, 2021. 455 с.
6. Регионы России. Социально-экономические показатели в 2020 году. Стат. сб. 1127 с. <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204>
7. *Рунова Т.Г., Волкова И.Н., Нефедова Т.Г.* Территориальная организация природопользования. М.: Наука, 1993. 208 с.
8. *Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Падалко Ю.А.* Проблемы гарантированного обеспечения водными ресурсами в бассейне реки Урал // Вопр. географии. Сб. 157. Водные проблемы и их решение. 2023. С. 250–273.
9. *Ткачев Б.П., Булатов В.И.* Малые реки: современное состояние и экологические проблемы (аналитический обзор). Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2002. 114 с.
10. *Ясинский С.В., Какутина Е.А., Сидорова М.В.* Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Изв. РАН. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130.
11. *Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Sci. 2013. V. 342. Iss. 6160. P. 850–853. DOI:10.1126/science.1244693
12. *Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.-P., Bagget, A., Kommareddy I., Kommareddy A.* The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results // Frontiers in remote sensing. 2022. V. 3. April 2022. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903
13. *Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C., Tyukavina A., Zalles V., Khan A., Song X.-P., Pickens A., Shen Q., Cortez J.* Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century // Nature Food. 2021. V. 3. DOI: 10.1038/s43016-021-00429-z
14. *Tyukavina A., Potapo P., Hansen M.C., Pickens A., Stehman S., Turubanova S., Parke D., Zalles A., Lima A., Kommareddy A., Song X.-P., Wang L., Harris N.* Global trends of forest loss due to fire, 2001–2019 // Frontiers in Remote Sensing. 2022. V. 3. DOI: 10.3389/frsen.2022.825190

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE FACTORS OF ANTHROPOGENIC TRANSFORMATION OF THE URAL RIVER DRAINAGE AREA

Zh. T. Sivokhip*, V. M. Pavleichik, A. A. Chibilev

Institute of Steppe, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Orenburg, 460000 Russia

**e-mail: sivohip@mail.ru*

The cartographic data on anthropogenically transformed areas within the Ural River basin were analyzed to reveal the features of their spatial heterogeneity. The characteristics of the distribution and longterm development dynamics of the main types of nature management, settlement system, transport infrastructure facilities, and large industrial plants were taken into account. The main factor of the spatial distribution of various types of economic activity was found to be the difference in the natural-resource potential due to the latitude-zonal and geological-geomorphological diversity of landscapes in the drainage area. It has been found that the most deeply transformed areas are located along the Ural River valley, which is due to the existing settlement system and the presence of guaranteed reserves of water resources. An important factor of the transformation of the Ural River drainage area is the mining industry, which forms large industrial agglomerations and serves as the main source of pollutants that enter river water.

Keywords: anthropogenic transformation, runoff-forming potential, latitudinal-zonal conditions, nature development, regulation of economic activity.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА р. УРАЛ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ СОВОКУПНОСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ¹

© 2024 г. А. М. Гареев^{a,*}, Д. И. Ахмедьянов^a, Ю. В. Островская^b, А. М. Шевченко^a

^aУфимский университет науки и технологий, Уфа, 450076 Россия

^bРеспубликанский детский эколого-биологический центр, Уфа, 450112 Россия

*e-mail: aufar.gareev@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 15.04.2024 г.

В бассейне р. Урал в течение последних десятилетий наблюдается довольно напряженная водохозяйственная и экологическая обстановка. Она характерна как для территории Российской Федерации, где происходит формирование основного количества водных ресурсов в целом по бассейну реки, так и для Казахстана. Количественное и качественное истощение водных ресурсов в последующем и резкое ухудшение экологических условий по многим участкам реки обуславливают необходимость широкомасштабного изучения имеющихся проблем на геосистемном уровне. Изложены результаты исследования малых рек бассейна р. Урал в пределах Российской Федерации, характеризующихся особенностями изменения речного стока и экологических условий в них в зависимости от влияния совокупности естественных и антропогенных факторов. В качестве методологической основы приняты геосистемный подход и бассейновый принцип, позволяющие всесторонне учитывать особенности влияния совокупности естественных и антропогенных факторов на формирование изменчивости количественных, качественных характеристик водотоков и экологических условий в них. Методы исследования следующие: обобщение и анализ материалов предшествующих исследований, проведение полевых изысканий и наблюдений, отбор проб воды и донных отложений, районирование изучаемой территории по видам и масштабам антропогенных нагрузок, определение характера загрязнения водотоков и изменения в них экологических условий в зависимости от влияния конкретных видов хозяйственной деятельности человека. В результате проведенного исследования выявлены особенности влияния хозяйственной деятельности человека на малые реки и природные комплексы их водосборов. Раскрыты характеристики пространственной и временной изменчивости факторов, влияющих на изменение склонового и речного стока. Изучены особенности влияния на качество воды в водных объектах и экологические условия в них антропогенных факторов, обоснованы предложения по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению малых рек — притоков различного порядка трансграничной р. Урал.

Ключевые слова: малая река, бассейн, хозяйственная деятельность, изыскания, деградация, влияющие факторы, экологические условия, бассейн реки Урал.

DOI: 10.31857/S0321059624050096 EDN: VXKFCY

ВВЕДЕНИЕ

Установление маловодной фазы на реках Южного Урала с начала 2000-х гг. и ее продолжение в настоящее время на фоне существенного изменения характера природопользования и усиления антропогенных нагрузок привели к резко неблагоприятным

ситуациям. Изменения, в основном проявляющиеся в ухудшении качества, а также в количественном истощении воды в водных объектах и резком ухудшении экологических условий в них, наблюдаются в бассейне р. Урал в пределах как Российской Федерации, так и Казахстана.

При выполнении данного исследования в качестве особо значимых приняты результаты комплексных изысканий в бассейнах малых рек, проведенных сотрудниками лаборатории водохозяйственных исследований и геоэкологии БашГУ (УУНиТ) в 2017, 2019, 2020 и 2023 гг.

¹ Работа выполнена в рамках научных исследований по договору между Институтом водных проблем РАН и Уфимским университетом науки и технологий в 2023 г. (тема “Научное обоснование предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной р. Урал (Жайык)”).

Характерная особенность бассейнов малых рек — притоков р. Урал в пределах Российской Федерации — их расположение в разных природно-климатических условиях. Анализ состояния природных комплексов на их водосборах позволил осуществить районирование изучаемой территории по степени и видам антропогенного воздействия и, соответственно, по сохранности речных экосистем (рис. 1).

Основные виды хозяйственной деятельности человека здесь следующие:

— сельское хозяйство — преимущественно организованный и неорганизованный выпас скота, растениеводство и водопользование в сельских населенных пунктах;

— горнодобывающая отрасль — горно-обогатительные комбинаты, обширные площади отвалов горных пород, хвостохранилищ, накопителей сточных вод и карьеров — оказывает сильное воздействие на природные комплексы речных водосборов и на сами малые реки;

— городские поселения, формирование урбанизированных ландшафтов, организация водопользования — влияющие на состояние малых рек и др.

Распределение указанных факторов по изучаемой территории неравномерно. В отдельных районах они накладываются друг на друга, что вызывает коренные нарушения многих характеристик малых рек, которые становятся

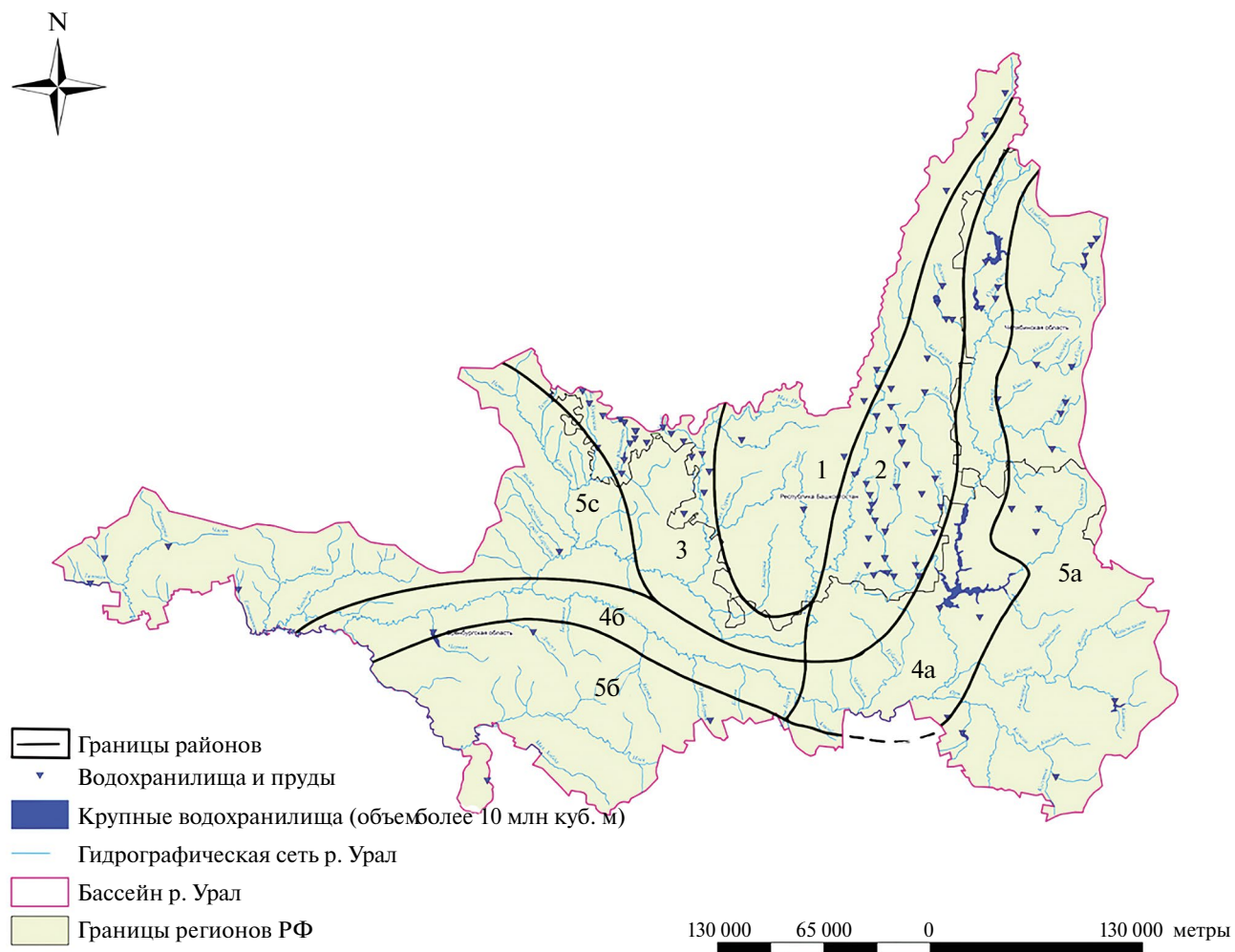


Рис. 1. Районирование бассейна р. Урал в пределах Российской Федерации по степени и видам преимущественного влияния хозяйственной деятельности на малые реки.

в этих случаях особо уязвимыми. Масштабы воздействия деятельности человека на природные комплексы, в том числе и водные экосистемы, имеют объективные причины. С одной стороны, это определяется пространственной дифференциацией физико-географических условий (показателей увлажнения, орографии местности, естественной водорегулирующей способности речных водосборов и др.), с другой — родом деятельности самого человека. Антропогенные факторы, связанные с коммунальным и сельским хозяйством, а также с рекреацией, приурочены, как правило, к наиболее легко доступным местам. Степень воздействия горнодобывающей отрасли связана с расположением разрабатываемых месторождений полезных ископаемых. В районе исследований они сосредоточены в меридиональной зоне, которая простирается в бассейне р. Урал преимущественно в пределах Зауральского пенеплена (в пределах Республики Башкортостан и Оренбургской области).

Следует обратить внимание на то, что бассейны большого количества малых рек подвергаются преимущественному влиянию животноводства. На изучаемой территории после распада СССР произошли большие изменения в способах содержания скота. Так, в бывшем Советском Союзе в бассейне р. Урал (в пределах РФ) преобладало содержание скота на животноводческих фермах и в комплексах. Для них были отведены пастбища, в ряде хозяйств проводились организация и эксплуатация долговременных культурных пастбищ (ДКП). Однако после распада СССР все изменилось не в лучшую сторону. Животноводческие фермы и комплексы были ликвидированы. В сельской местности возникли социально-экономические проблемы, местное население стало адаптироваться к меняющимся условиям. Распространились экстенсивные способы хозяйствования, жители вынуждены увеличить поголовье скота в личном (подсобном) хозяйстве, так как это часто стало единственным способом выживания жителей. При этом изменились места и способы выпаса. Так, в течение последних десятилетий, характеризующихся усилением засушливости климата, травостой на склонах долин рек в июле—августе засуш-

ливых лет (2010, 2012, 2014, 2020, 2022 гг.) высыхает. В этих условиях водоохранные зоны становятся единственным местом, где можно пасти скот. Местные жители так и поступают. В результате, с одной стороны, чрезмерный выпас крупного рогатого скота, овец и лошадей приводит к вытаптыванию травостоя, переуплотнению верхних слоев почвенного покрова, становится причиной активизации эрозионных и русловых процессов, стимулируя трансформации склонового и речного стока, заиление русел рек в низовьях; с другой — способствует чрезмерному загрязнению вод веществами органического происхождения. Эти закономерности раскрыты в большом количестве опубликованных работ [5–13].

Под влиянием предприятий горнодобывающей промышленности формируются коренным образом нарушенные ландшафты территорий: карьеры и отвалы горных пород, хвостохранилища, свалки. Многие из этих объектов расположены в непосредственной близости к рекам, в том числе и в пределах водоохранных зон. Степень нарушенности природных комплексов на водосборах ряда рек достигает той величины, когда эти территории можно отнести к категории бедлендов. Например, это четко обнаруживается на водосборах рек Худолаз и Карагайлы под влиянием объектов горнодобывающей и других отраслей в пределах городского округа г. Сибая.

В ходе полевых изысканий и наблюдений летом 2023 г. внимательно изучались характерные виды влияния хозяйственной деятельности на малые реки и их водосборы. При выборе мест расположения точек наблюдений учитывался характер и масштабы влияния хозяйственной деятельности человека на водотоки и их водосборы. С учетом этого выделены следующие категории малых рек:

— с достаточно высоким уровнем сохранности природных комплексов на их водосборах при слабом или умеренном влиянии преимущественно экстенсивного выпаса скота, хорошо сохранившимся гидрологическим режимом, гидрохимическими характеристиками и экологическими условиями;

– с преимущественным влиянием объектов сельскохозяйственного производства (пастбищ, пашен и др.);

– с разной степенью изменения и трансформации под совместным влиянием объектов горнодобывающей и других отраслей (чрезмерного выпаса скота).

К первой категории относятся реки Безымянный (с. Бурангулово), Бирся (выше д. Калканово), Малый Кизил (выше д. Новоабзаково). Их бассейны полностью или в основном находятся на территориях хорошо сохранившихся ландшафтов восточных склонов Южного Урала. Здесь распространены лесные и лесостепные сообщества, слабо затронутые хозяйственной деятельностью. В последнем факторе доминирует неорганизованный выпас скота. Эти реки находятся в пределах района 1 (рис. 1).

Ко второй категории относятся реки Урал (с. Рысаево, выше д. Уразово), Янгелька (исток из оз. Чебаркуль), Худолаз (п. Казанка) и др. Бассейны указанных рек, включая водосборы, водоохранные зоны, прибрежные полосы и русла рек, преимущественно подвержены чрезмерному влиянию выпаса крупного рогатого скота и лошадей. Соответственно, загрязнение указанных рек в основном происходит веществами биогенного происхождения.

К третьей категории относятся реки Худолаз (с. Калинино), Карагайлы, Таналык, Бузавлык, Блява и др., протекающие в зоне массивированного влияния добычи руд цветных металлов и их обогащения на горно-обогатительных комбинатах. На это влияние также накладываются чрезмерный (неуправляемый) выпас скота на речных водосборах, а также другие виды хозяйственной деятельности человека. В связи с этим в течение продолжительного времени наносится большой ущерб данным малым рекам и их экосистем, как сосредоточенно (локально), так и рассредоточенно (диффузно).

Таким образом, к категориям малых рек с наибольшими, коренными изменениями гидрологического режима, гидрохимических, гидробиологических характеристик и экологических

условий, следует отнести саму р. Урал в верховьях, а также ее притоки – реки Худолаз с притоком Карагайлы, Таналык, Бузавлык, Блява.

Территории протекания малых рек, отнесенных авторами статьи ко второй и третьей категориям, соответствуют району 2 на рис. 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности состояния и изменения гидролого-экологических характеристик малых рек в зависимости от разного влияния совокупности естественных и антропогенных факторов изучались на 17 участках. Участки размещались на местности с учетом возможности проведения сравнительного анализа сформировавшихся и измененных экологических условий, с определением, с одной стороны, фоновых показателей, с другой – специфики и масштабов влияния антропогенных факторов на сообщества гидробионтов. На них проведен отбор проб воды и донных отложений, фитопланктона, фито- и зообентоса, а также выявлен состав ихтиофауны. В местах отбора проб измеряли расход, температуру и прозрачность воды, глубину, определяли тип донных отложений. Химический анализ проб воды и донных отложений проводился в аттестованной испытательной лаборатории Филиала по мониторингу водных объектов бассейнов рек Белой и Урал “Центррегионводхоза”. Отбор и обработку гидробиологических проб осуществляли по общепринятым методикам [4, 23]. Для идентификации гидробионтов, расчета частоты встречаемости видов использовали имеющиеся руководства и определители [15, 19, 26–30, 31]. Для индикации качества воды по структурно-функциональным характеристикам сообществ применялись система сапробности Кольквитца–Марсона и метод Пантле–Букк [1, 4, 20, 22, 25, 34].

Оценка влияния хозяйственной деятельности на качество вод по гидрохимическим и гидробиологическим показателям показала, что значения комплексного показателя загрязнения (КПЗ) по всем участкам наблюдений не соответствуют предъявляемым требованиям. Так, по участкам наблюдений они достигают значений от 18.57 до 284.02, что характеризует качество воды как “грязная” и “чрезвычайно грязная”.

Реки первой категории (район 1)

Расположение участков, на которых проводились комплексные изыскания и исследования, показаны на рис. 2. К ним относились: р. Урал – 300 м выше д. Рысаево (участок 1), руч. Безымянный – выше д. Бурангулово (2), р. Бирся – 2.2 км выше д. Калканово (3), р. Урал – 2.5 км выше д. Уразово (4), р. Малый Кизил – 3.9 км выше с. Новоабзаково (5), р. Янгелька – д. Давлетово (6), р. Худолаз – д. Казанка (7), р. Таналык – ниже г. Баймак (8), Р. Таналык – выше г. Баймак (9), р. Худолаз – д. Калинино (10), р. Карагайлы – устье (11), р. Бузавлык – выше сброса сточных вод из карьера “Юбилейного” (12), р. Бузавлык – ниже сброса сточных вод (13), р. Таналык – выше пос. Бурибай (14), р. Тана-

лык – ниже сброса сточных вод (15), р. Блява – выше г. Медногорск (16), р. Блява – ниже сброса сточных вод Медногорским ГОК в створе д. Бляватамак (17).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований выявлено, что по ряду фоновых створов, выше которых степень влияния хозяйственной деятельности на ландшафты мала, наблюдаются высокие концентрации отдельных веществ, превышающие ПДК в несколько раз. Например, это выявлено на руч. Безымянном – притоке р. Урал первого порядка, выше небольшого населенного пункта Бурангулово Учалинского района Республики Башкортостан (участок 2). Так, здесь concentra-

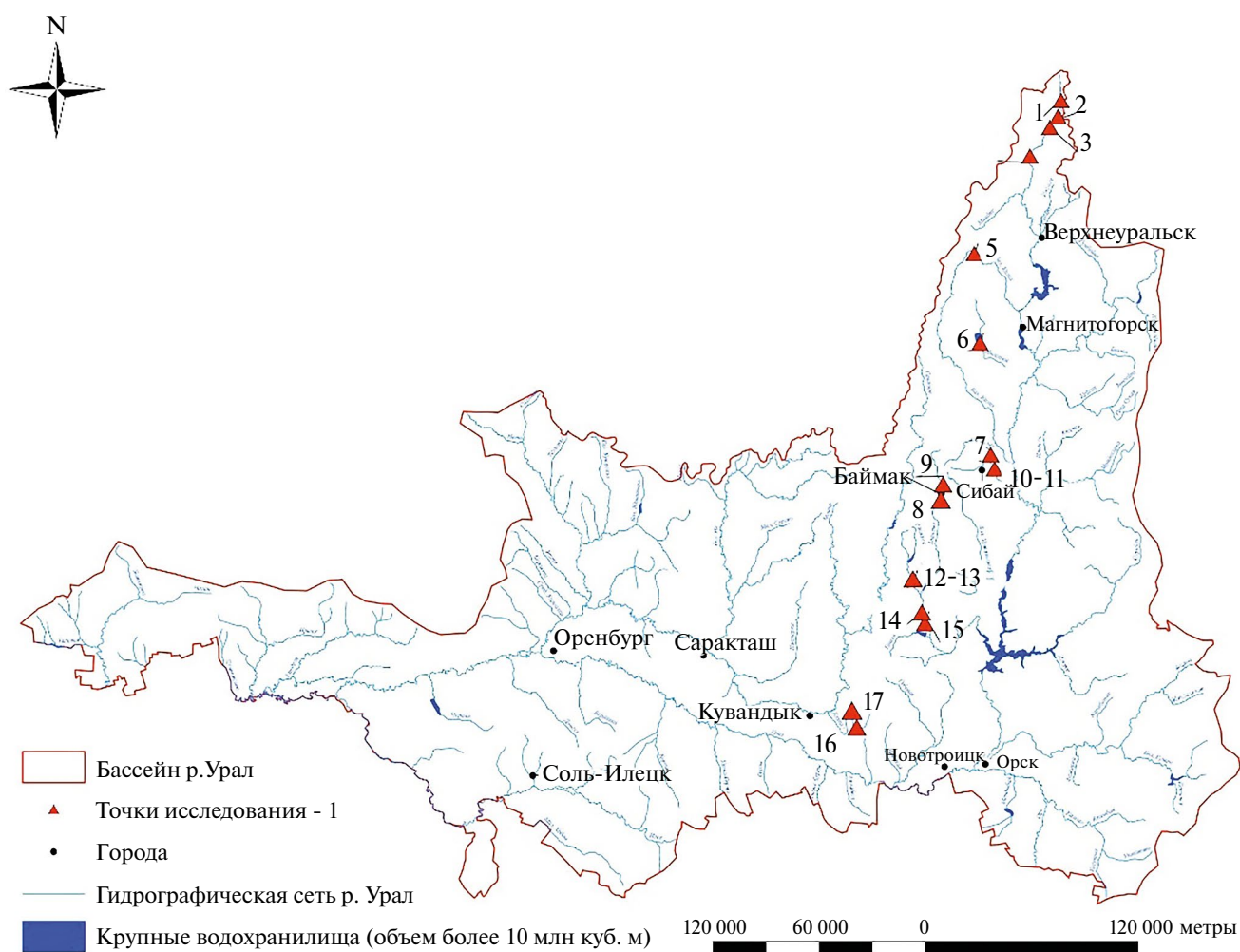


Рис. 2. Места расположения участков изысканий и наблюдений на малых реках бассейна р. Урал (в пределах Российской Федерации).

ции марганца $>ПДК_{рх}$ в 2,8, железа — в 8 раз. Это, очевидно, связано с естественным вымыванием элементов металлической группы из коренных пород в горах Урала. Из рыб здесь обнаружен гольян в довольно большом количестве. Как известно, этот вид считается индикатором чистой воды, однако ему может быть свойственна определенная экологическая пластичность [20]. По фитопланктону, фито- и зообентосу показатели качества воды здесь оцениваются как β -мезосапробные, по ихтиофауне — олигосапробные. Это связано с тем, что ихтиофауна, в отличие от бентоса, живет в различных горизонтах, а также она намного более мобильна, нежели планктон и бентос. По совокупности признаков вода в ручье относительно чистая.

Кроме того, по отдельным участкам, выше которых водосборы испытывают небольшие антропогенные нагрузки (пастбищ, населенных пунктов), реки относятся к категории наименее загрязненных при расчете индекса сапробности Пантле—Букк по зообентосу. Например, к таким относятся участки 3 (р. Бирся) и 6 (р. Янгелька в верховьях). Аналогичную картину на этих створах показала и оценка по фитопланктону (рис. 2). На р. Бирсе в 2,2 км севернее д. Калканово из рыб также обнаружен только гольян, но в меньшем количестве, чем на предыдущем участке (на руч. Безымянном). Также здесь ниже содержание кислорода (6,26 ppm), а в грунте — повышенное содержание марганца (231 ± 58 мг/кг). Расчет индексов сапробности, проведенный по фитопланктону, а также фито- и зообентосу, позволяет отнести данный водоток к β -мезосапробной зоне, присутствие единственного вида рыб (гольяна) характеризует ее как олигосапробную. Причины данных различий аналогичны причинам на предыдущей станции. По совокупности признаков экологическая обстановка менее благоприятна, чем на предыдущем водотоке.

На р. Малый Кизил из рыб обнаружен только пескарь в небольшом количестве, хотя ихтиофауна в подобных водотоках должна быть более разнообразной и включать в себя по крайней мере гольяна, хариуса, форель, ельца и другие виды [2, 16, 17]. Вода была замутнена, наблюдались обильные обрастания нитчатых водорослей на подводных предметах, что не характерно для

чистых горных рек. В воде выявлено довольно низкое содержание растворенного кислорода (4,90 ppm) и повышено количество нитратов ($3,8 \pm 0,5$ мг/дм³). Все вышеуказанное свидетельствует о чрезмерно высоком уровне эвтрофикации водотока. Это обусловлено локализацией здесь относительно крупных населенных пунктов, горнолыжного центра Абзаково, ряда предприятий (ООО “Абзаково”, ООО “Строительство и производство”). Ниже сбросов сточных вод обнаружены высокие концентрации нитрит-иона, которые $>ПДК$ в 2,75 раза. Качество воды, определенное в совокупности по фитопланктону, фито- и зообентосу и ихтиофауне, соответствует β -мезосапробным условиям.

Реки второй категории (район 2)

По рекам, относящимся ко второй категории, наблюдается влияние чрезмерного выпаса скота, соответственно — загрязняющих веществ биогенного происхождения. Наиболее характерный здесь участок — р. Урал у с. Рысаево, где обнаруживается превышение ПДК по NH_4^+ . Кроме того, здесь и в р. Урал выше д. Уразово, а также в реках Янгельке (исток из оз. Чебаркуль), Худолаз (п. Казанка) обнаружены тяжелые металлы в высоких концентрациях ($>ПДК$ в 2,8–15 раз).

По сосредоточенным сбросам, влияющим на р. Урал, оценена деятельность “Учалыводоканала”. Это первое предприятие, сбрасывающее свои стоки после очистки на очистных сооружениях в верховьях р. Урал. В пробах воды, отобранных из реки ниже сброса указанного предприятия (выше д. Уразово Учалинского района), выявлено превышение ПДК по меди и марганцу в 9 раз, железу в 3 раза. Из специфических загрязнителей в р. Урал фиксируются азотистые соединения нитрит-иона с превышением ПДК в 3 раза. При сравнении показателей загрязненности речных вод с фоновыми концентрациями (руч. Безымянный у с. Бурангулово Учалинского района) можно выявить превышение загрязнения по этому ингредиенту в 12 раз. Следует обратить внимание на то, что в бассейнах указанных водотоков крупных объектов, относящихся к горнодобывающей отрасли, нет. Следует полагать, что в формировании химического состава вод принимают участие месторождения горных

пород, а также отвалы, содержащие значительные концентрации указанных элементов.

Расчет индекса сапробности по Пантле—Букк по зообентосу позволил отнести створ р. Урал (выше д. Рысаево) к числу умеренно загрязненных. Аналогичную картину здесь показала и оценка состояния вод по фитопланктону. Условия по зообентосу в р. Урал на 1.5 км севернее от с. Уразово можно характеризовать как α -мезосапробные (“грязные”). Здесь отчетливо проявляется влияние сброса сточных вод г. Учалы после их очистки в очистных сооружениях. Показательно то, что на данном участке выявлены высокие концентрации растворенного кислорода (10 ppm), что связано с активными процессами фотосинтеза водной растительности (макрофитов и водорослей) в летнее время.

В ихтиофауне р. Янгельки обнаружено 6 видов рыб. Показатель содержания кислорода в воде составил 6.24 ppm, в донных отложениях наблюдается повышенное содержание марганца (796 ± 199 мг/кг), а также цинка (236 ± 71 мг/кг). Налицо также признаки устойчивой эвтрофикации: высокая степень зарастания водотока высшей водной растительностью (большое количество рдестов, водокраса, урути, элодеи), а также распространение нитчатых водорослей, заметное замутнение воды, слой ила на каменисто-галечном ложе реки. Показатели сапробности, рассчитанные по фитопланктону, фито- и зообентосу, позволяют отнести воду р. Янгельки к β -мезосапробной зоне. Индекс Кольквитца—Марссона, рассчитанный по ихтиофауне, также показывает β -мезосапробные условия, индекс Пантле—Букк — 3.08, что соответствует α -мезосапробной зоне.

В р. Худолаз (д. Казанка) — выше зоны выклинивания Худолазовского водохранилища и промышленных предприятий г. Сибая — обнаружены 6 видов рыб: плотва, окунь, серебряный карась, язь, налим, сом. Преобладающие виды — плотва и окунь. Содержание кислорода в воде составило 5.57 ppm, по результатам химического анализа воды и грунта, условия вполне благоприятные, за исключением некоторого повышения содержания цинка в донных отложениях (106 ± 32 мг/кг). Показатели качества воды

р. Худолаз на данном участке, рассчитанные по фитопланктону и фитобентосу, соответствуют β -мезосапробной зоне, по зообентосу — α -мезосапробной. Индекс Кольквитца—Марссона, рассчитанный для ихтиофауны, показывает также β -мезосапробные условия, а Пантле—Букк — α -мезосапробные.

Реки третьей категории (район 2 на рис. 1)

По всем участкам рек, расположенным в зонах массивированного влияния объектов горнодобывающей отрасли (8–17), наблюдаются высокие концентрации тяжелых металлов. Наибольшие обнаружены в водах рек Карагайлы — с. Калинино (медь — 240 ПДК), Худолаз — с. Калинино (медь — 87 ПДК), Таналык — ниже г. Баймак (медь — 33 ПДК), Бузавлык (створы 12 и 13 — медь 25–32 ПДК), Бляве — г. Медногорск (марганец — 260 ПДК), Бляве — с. Бляватамак (цинк — 160 ПДК), что обусловило формирование чрезвычайно высоких комплексных показателей загрязнения (КПЗ) — 31.96–284.02.

Наиболее интенсивное загрязнение специфическими ингредиентами выявлено в водах р. Таналык у г. Баймака ниже сброса “Баймакского водоканала”. В проанализированной пробе воды из этой реки выявлено превышение по аммоний-ионам — в 5.2 раза, нитрит-ионам — в 5.25 раз, концентрация сухого остатка — в 1.5 раза. В то же время по участку выше г. Баймака (в 2.2 км выше створа сброса сточных вод города) качество воды по этим показателям $\leq$ ПДК.

К категории малых рек, в наибольшей степени деградированных по морфометрическим характеристикам их русел, степени загрязненности, прежде всего тяжелыми металлами, следует отнести р. Карагайлы в зоне влияния объектов г. Сибая. В бассейне среднего (частично) и нижнего течения этой реки обнаружено высокое сосредоточение разных хозяйственных объектов и урбанизированных территорий. К их числу относятся сам г. Сибай, отвалы горных пород на значительных площадях, карьеры, хвостохранилища, свалки и др. В речной воде и донных отложениях обнаружены высокие концентрации загрязняющих веществ, относящихся к разным группам по лимитирующему признаку вредно-

сти. Так, влияние сточных вод города может быть оценено по степени загрязнения речных вод фосфат-ионом — в 3.75 раз, сухому остатку — в 4.5 раз. Подотвальные воды северных отвалов Сибайского рудника поступают в карьер и вместе с шахтными водами откачиваются на поверхность и далее по коллектору сбрасываются в р. Карагайлы. В нее же без очистки направляются стоки южных отвалов. Подотвальные воды высокоминерализованы — до 515 г/л; pH — 2.1–2.6; концентрации сульфат-иона достигают 29500 мг/л; содержание меди — 330–645, цинка — 718–890, железа — 188–731, магния — 190 мг/л; повышены концентрации марганца, никеля, кобальта, кадмия, ртути и др. Объем подотвальных вод Сибайского рудника составляет 650 тыс. м³ в год. До 2019 г. суммарный расход шахтных и карьерных вод колебался в пределах от 200 до 800 м³/ч. Объем откачиваемых дренажных вод во время разработки месторождения составлял 3.2–3.5 млн м³ в год.

По ориентировочным оценкам, за год с подотвальными и шахтными стоками в поверхностные водные объекты сбрасывается до 10 тыс. т химических веществ, включая сотни тонн тяжелых металлов в ионной форме. В р. Карагайлы, куда непосредственно сбрасывались сточные воды Сибайского ГОК до его закрытия в 2019 г., наблюдались экстремально высокие концентрации ионов тяжелых металлов и сульфатов.

В донных отложениях рек Карагайлы и Худолаз (ниже г. Сибая) установлено увеличение содержания тяжелых металлов в десятки и сотни раз по сравнению с фоновыми концентрациями. Следует отметить то, что отдельные участки бассейнов этих рек представляют собой зоны экологического бедствия.

Бузавлык ниже сброса ООО “Башкирская медь” загрязнена солями меди до 32 ПДК.

По результатам анализа проб воды из реки Таналык у пос. Бурибай, где размещено производство горно-обогатительного комбината, выявлено превышение содержания специфических металлов в воде. Концентрация меди была выявлена по участку 14, где она была >ПДК в 20 раз, по марганцу >ПДК в 8 раз.

Накопители сильно загрязненных сточных вод Бурибаевского ГОК расположены в непосредственной близости к р. Таналык. В их использовании в составе замкнутых систем водоснабжения промышленного предприятия наблюдаются серьезные нарушения. По телу обваловок образовались промоины, на низинах со стороны сухого откоса (с внешней стороны) местами образовались лужи с сильно концентрированными сточными водами. Фильтрация концентрированных сточных вод через тело дамбы, а также формирование линий тока — причина чрезмерного загрязнения вод р. Таналык тяжелыми металлами.

Аналогичное загрязнение вод наблюдается и по р. Бляве, принимающей стоки Медногорского ГОКа. В пробе воды из р. Блявы ниже сброса “Медногорского медно-серного комбината” (у с. Бляватамак) выявлено превышение концентрации меди в 10 раз по сравнению со створом, расположенным выше г. Медногорска. Аналогичная ситуация обнаружена и по концентрациям цинка. Так, если в пробе воды, отобранной у с. Бляватамак (ниже города), она составила 1.6 мг/дм³, то выше зоны влияния сточных вод ГОКа она была ~0.03 мг/дм³, т. е. превышение — в 53 раза (участки 16 и 17).

Анализ степени сапробности по фитопланктону и фитобентосу на указанных участках показал уменьшение сапробности, а также стабильно низкое видовое разнообразие [3, 32, 33]. Кроме того, в обеих пробах обнаружены тератологические формы диатомовой водоросли *Nitzschia sp.* с искривленным панцирем. Все это выражает высокий уровень загрязненности водотока и неблагоприятность среды обитания для гидробионтов [3, 4, 23].

Следует обратить внимание на то, что на сильно загрязненных участках рек: Худолаз — ниже устья р. Карагайлы (участок 10), Карагайлы — устье (участок 11), Блява — г. Медногорск, ниже сброса (участок 17) — зарегистрировано наименьшее среди всех исследованных точек видовое разнообразие зообентоса. У выявленных личинок хирономид *Chironomus gr. dorsalis*, *Ch. gr. tentans*, *Procladius ferrugineus* и *P. choreus* отмечены деформация элементов ротового аппарата (ментума и мандибул) и их покрытие

смолоподобным веществом, что, скорее всего, связано с накоплением загрязняющих веществ в донных отложениях водотоков [1, 21].

Обращают на себя внимание достаточно высокие показатели численности биомассы зообентоса на участках 10 и 17 (рис. 2) на фоне небольшого количества видов. Известно, что при возрастании антропогенной нагрузки резко снижается видовое разнообразие донных сообществ на фоне доминирования отдельных видов [4], что и наблюдается на данных участках. Так, в р. Худолаз (створ 10) максимум численности и биомассы имеет полисапробный вид — олигохета *Tubifex tubifex*, а в створе 17 (р. Блява) — полисапробные виды хирономид.

Согласно расчетам индекса Пантле—Букк по зообентосу, условия в водотоках на створах 9 (р. Таналык, севернее на 1.3 км от г. Баймак), 12 (р. Бузавлык, на 2.2 км юго-восточнее от д. Петропавловский, в зоне комбината Башнефти) и 16 (Оренбургская область, р. Блява) можно характеризовать как α -мезосапробные (“грязные”).

Самыми загрязненными по данному показателю оказались участки рек на створах 10 (р. Худолаз — ниже устья), 11 (р. Карагайлы — устье) и 17 (р. Блява, г. Медногорск, ниже сброса). На них индекс сапробности колебался в пределах 4.0–4.5, что соответствует полисапробной зоне.

При анализе изменения уровня сапробности в створах отдельных рек можно заметить ее явное увеличение при повышении степени антропогенного воздействия. Так, для р. Таналык в створе 10, расположенном выше сброса загрязняющих веществ, значение индекса сапробности — 1.9, что характеризует данный участок как умеренно-загрязненный (β -мезосапробный); в точке 9, расположенной после сброса загрязняющих веществ, значение индекса Пантле—Букк соответствует α -мезосапробной (“грязной”) зоне. Аналогичную картину показывает и оценка состояния р. Таналык по фитопланктону, фитобентосу и ихтиофауне [1–4].

В результате смешения и разбавления сильно загрязненных вод притоков в принимающих эти воды реках обнаруживаются благоприятные

по показателям ихтиофауны гидролого-экологические условия. Так, в р. Худолаз (ниже устья р. Карагайлы) обнаружено 7 видов рыб, из которых самой многочисленной была плотва. Примерно в равных количествах встречались елец, пескарь, красноперка и окунь, наиболее редкими оказались щука и голавль. Показатели качества воды, рассчитанные по ихтиофауне, соответствуют β -мезосапробной зоне с уклоном в олигосапробную, в то время как в самой р. Карагайлы (приток р. Худолаз) ихтиофауна отсутствовала.

Для р. Бузавлык (участки 13 и 14) также отмечен рост индекса сапробности — с 2.3 (нижняя граница β -мезосапробной зоны) в створе выше водохранилища до 2.6 (α -мезосапробная зона) на участке ниже сброса с отстойника “Башнефть”. В этой реке, как и в р. Карагайлы, ихтиофауна отсутствует.

По р. Бляве в окрестностях г. Медногорска (точки 16 и 17) в целом отмечен один из самых высоких уровней сапробности (значение индекса — 3.4–4.2). Если в точке выше сброса реку еще можно охарактеризовать как “грязную” (α -мезосапробную), то ниже сброса вода реки соответствует категории “очень грязная” (полисапробная). Выше сброса также обнаружено небольшое количество пескаря, ниже сброса какая-либо ихтиофауна отсутствовала полностью. По многим показателям это один из самых экологически неблагополучных участков.

По подрайонам 5а, 5б, 5с (рис. 1) основные виды хозяйственной деятельности, оказывающие влияние на химические показатели речных вод, — сельскохозяйственные объекты (населенные пункты, пашни, пастбища и др.). В отсутствие материалов непосредственных наблюдений экологические условия в малых реках могут быть определены по аналогии, что было раскрыто ранее по районам 1, 2. Район 3 характеризуется аналогичными условиями. Отличительная особенность — наличие значительного количества прудов и водохранилищ, обуславливающих коренные изменения гидрологического режима и экологических условий в водотоках.

Малые реки, впадающие непосредственно в Урал в пределах разных участков в подрайонах

4а и 4б, характеризуются большой разницей степени антропогенного влияния. Как известно, бассейны одних из них расположены в зонах непосредственного влияния промышленных узлов (города Верхнеуральск, Магнитогорск, Орск, Оренбург), других — в условиях преимущественного влияния сельскохозяйственных объектов. При необходимости изучение их характеристик может быть осуществлено отдельно.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что малые реки, особо чувствительные к влиянию как естественных, так и антропогенных факторов на их водосборах, достаточно ярко отражают особенности влияния указанных факторов на количественные и качественные характеристики воды в водотоках. Это позволяет объективно обосновать необходимые водоохранные мероприятия, особенно с учетом специфики и масштабов влияния антропогенных факторов, приуроченных к водосборам рек и влияющих на качество речных вод и экологические условия в водотоках. Следует констатировать, что различия направлений, масштабов и ареалов влияния отдельных видов хозяйственной деятельности могут проявляться при районировании изучаемых бассейнов больших рек, в которых можно выявлять отличающиеся процессы формирования и изменчивости экологических условий в малых реках. Указанные положения достаточно четко отражены в данной работе на примере бассейна р. Урал в пределах Российской Федерации.

Следует обратить внимание на то, что в механизмах управления водопользованием и водоохранными мероприятиями в соответствии с требованиями, отраженными в Схемах комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО), учтены результаты исследований показателей воздействия локализованных (сосредоточенных) источников. В то же время в отдельных бассейнах малых рек масштабы влияния рассредоточенных источников (например, сельскохозяйственных объектов, урбанизированных территорий и др.) могут быть преобладающими или основными. Это отражается на соответствующих неблагоприятных процессах как на водосборе, так и в самих водных объек-

тах, проявляется в соответствующем изменении показателей загрязнения и экологических условий в них. Таким образом, дальнейшее совершенствование методов и способов управления водопользованием и водоохранными мероприятиями в бассейнах рек должно учитывать указанные положения. В свою очередь, дифференцированный подход при этом будет в максимальной степени способствовать обоснованию необходимых водоохранных мероприятий, что осуществлено в ходе выполнения научно-исследовательских работ в 2023 г. по обоснованию предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной р. Урал (Жайык). Необходимо рассмотрение вопроса об их внедрении на уровне Министерства природопользования и экологии РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баканов А.И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов / А.И. Баканов // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 68–82.
2. Бакланов М.А. Фауна и особенности рыб малых рек урбанизированных территорий Прикамья. Автореферат дис. ... канд. биол. наук. Пермь, 2002. 18 с.
3. Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 500 с.
4. Биоиндикация экологического состояния равнинных рек / Под ред. О.В. Бухарина, Г.С. Розенберга. М.: Наука, 2007. 403 с.
5. Гареев А.М. Методические вопросы пространственно-временного анализа развития ускоренной эрозии // Четырнадцатое пленарное межвуз. координацион. совещ. по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов. Уфа: Изд-во БашГУ, 1999. С. 14–17.
6. Гареев А.М. Методические указания по оптимизации выделения капиталовложений на водоохранные мероприятия на водосборе бассейна реки. Уфа: РИО Башкирского ун-та, 1991. 19 с.
7. Гареев А.М. Некоторые характеристики изменения склонового и речного стока в условиях деградации природных комплексов на водосборе // Вод. хоз-во России. Спецвып. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2003.
8. Гареев А.М. Оптимизация водоохранных мероприятий в бассейне реки (географо-экологический аспект). СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 190 с.

9. *Гареев А.М.* Основы научных исследований. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. 78 с.
10. *Гареев А.М.* Особенности активизации развития эрозионных процессов в зависимости от увеличения максимального стока на водосборе в условиях деградации природных комплексов // Чистая вода России. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2005. С. 21–22.
11. *Гареев А.М.* Охрана вод суши. Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. 336 с.
12. *Гареев А.М.* Реки, озера и болотные комплексы Республики Башкортостан. Уфа: АН РБ, Гилем, 2012. 248 с.
13. *Гареев А.М., Белан Л.Н., Горячев В.С., Фархутдинов А.М., Барышев В.И., Шевченко А.М., Островская Ю.В., Ахмедьянов Д.И.* Основные характеристики трансформации гидролого-экологических условий в малых реках в зоне влияния объектов горнодобывающей отрасли (на примере рек Карагайлы и Худолаз в бассейне реки Урал) // Вестн. Академии наук Республики Башкортостан. 2021. Т. 39. № 2 (102). С. 49–57. DOI: 10.24412/1728-5283-2021-2-49-57
14. *Гареев А.М., Мусин С.Н.* Особенности трансформации склонового, речного стока и развития эрозионных процессов в зависимости от влияния пастбищной нагрузки на природные комплексы // Семнадцатое межвуз. координацион. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Краснодар, 2002. С. 79–80.
15. *Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. Синезеленые водоросли. М.: Сов. наука, 1953. 654 с.
16. *Дьяченко И.П.* Рыбы и рыбные ресурсы Башкортостана: учебное пособие. Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. 152 с.
17. *Дьяченко И.П., Биккинин Р.Ф.* Рыбы Башкирии // Экология водоемов Башкирии. Уфа: Гилем, 1998. С. 94–135.
18. *Захаров В.Ю.* Состояние ихтиофауны в водоемах Удмуртии как отражение антропогенного прессы // Экологические проблемы Предуралья: стратегия изучения и пути решения. Материалы науч.-практ. конф. Ижевск, 1994. С. 135–137.
19. *Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4. Диатомовые водоросли. М.: Сов. наука, 1951. 620 с.
20. *Каплин В.Г.* Биоиндикация состояния экосистем. Самара: СГСХА, 2001. 144 с.
21. *Котегов Б.Г.* Видовой состав ихтиофауны и антропогенные сукцессии ихтиоценозов малых рек Удмуртии // Современные аспекты экологии и экологического образования. Материалы Всерос. науч. конф. Казань: КФУ, 2005. С. 240–241.
22. *Макрушин А.В.* Биологический анализ качества вод Л.: ЗИН АН СССР, 1974. 60 с.
23. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / Под ред. *В.Н. Митропольского, Ф.Д. Мордохай-Болтовского.* М.: Наука, 1978. 240 с.
24. *Никольский Г.В.* Экология рыб. М.: Высш. шк., 1974. 367 с.
25. *Олексив И.Т.* Показатели качества природных вод с экологических позиций. Львов: Свит, 1992. 232 с.
26. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. *С.Я. Цалолихина.* СПб.: Наука, 1994. Т. 1. 395 с.
27. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. *С.Я. Цалолихина.* СПб.: Наука, 1995. Т. 2. 628 с.
28. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. *С.Я. Цалолихина.* СПб.: Наука, 1997. Т. 3. 440 с.
29. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. *С.Я. Цалолихина.* СПб.: Наука, 2001. Т. 5. 836 с.
30. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под ред. *С.Я. Цалолихина.* СПб.: Наука, 2004. Т. 4. 987 с.
31. *Панкратова В.Я.* Личинки и куколки комаров подсемейства Chironominae (Diptera, Chironomidae) фауны СССР. Л.: Наука, 1983. 296 с.
32. *Соколов Л.И.* Антропогенные изменения ихтиофауны рек Центральной России // Соросовский образовательный журн. Т. 7. № 1. 2001. С. 19–25.
33. *Шевченко А.М.* Современные тенденции изменения состава ихтиофауны верховьев бассейна реки Урал // Материалы по флоре и фауне Республики Башкортостан. Науч. журн. Вып. XXI (декабрь) / Отв. ред. *В.А. Валуев.* Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. С. 119–129
34. *Sládeček V.* System of water quality from the biological point of view. Archiv für Hydrobiologie — Beiheft: Ergebnisse der Limnologie 7. Stuttgart, 1973. 218 s.

FEATURES OF THE FORMATION AND VARIABILITY OF HYDROLOGICAL AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SMALL RIVERS IN THE RIVER BASIN OF THE URAL RIVER UNDER THE INFLUENCE OF A COMBINATION OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS

A. M. Gareev^{a, *}, D. I. Akhmedyanov^a, Yu. V. Ostrovskaya^b, A. M. Shevchenko^a

^a*Ufa University of Science and Technology,
Republic of Bashkortostan, Ufa, 450076 Russian*

^b*Republican Children's Ecological and Biological Center,
Republic of Bashkortostan, Ufa, 450112 Russian*

**e-mail: aufar.gareev@mail.ru*

In the Ural River basin, the water management and environmental situation has been rather tense over the past decades. It is typical both for the territory of the Russian Federation, where the main amount of water resources are formed in the river basin as a whole, and for Kazakhstan. The quantitative and qualitative depletion of water resources, and the subsequent sharp deterioration of environmental conditions in many sections of the river, necessitates a large-scale study of existing problems at the geosystem level. Based on the above, the article presents the results of a study of small rivers in the Ural River basin within the Russian Federation, characterized by features of changes in river flow and environmental conditions in them depending on the influence of a combination of natural and anthropogenic factors. The geosystem approach and basin principle are adopted as a methodological basis, allowing for a comprehensive consideration of the specific influence of a combination of natural and anthropogenic factors on the formation of variability in the quantitative and qualitative characteristics of watercourses and environmental conditions in them. Research methods include: generalization and analysis of materials from previous studies, conducting field surveys and observations, sampling water and bottom sediments, zoning the study area according to the types and scale of anthropogenic loads, determining the nature of pollution of watercourses and changes in their environmental conditions depending on the impact of specific types of human economic activity.

As a result of the conducted research, the features of the influence of human economic activity on small rivers and natural complexes of their catchments were revealed. The characteristics of spatial and temporal variability of factors influencing changes in slope and river runoff are revealed. The features of the influence of anthropogenic factors on the quality of water in water bodies and the ecological conditions in them were studied, proposals for the ecological rehabilitation, preservation and restoration of small rivers - tributaries of various orders of the transboundary Ural River – were substantiated.

Keywords: small river, basin, economic activity, research, degradation, influencing factors, environmental conditions, Ural River basin.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАРЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА МАЛЫХ РЕК БАСЕЙНА р. УРАЛ ВОДОХРАНИЛИЩАМИ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ¹

© 2024 г. А. М. Гареев*, В. С. Горячев

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, 450074 Россия

*e-mail: aufar.gareev@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 10.04.2024 г.

Принята к публикации 18.04.2024 г.

Раскрыты основные положения оптимального зарегулирования стока малых рек водохранилищами. В качестве новых методических подходов приняты положения, учитывающие необходимость дифференцированного анализа физико-географических условий территорий, где расположены бассейны изучаемых рек. Это имеет наибольшую значимость в условиях формирования регионального отклика на глобальное потепление климата с совокупностью неблагоприятных хозяйственно-экономических и экологических последствий. В качестве методологической основы приняты геосистемный подход и бассейновый принцип, позволяющие всесторонне учитывать особенности влияния естественных и антропогенных факторов на формирование изменчивости количественных, качественных характеристик воды в водотоках и экологических условий в них. Методы исследования следующие: физико-географическое районирование бассейна р. Урал в пределах Российской Федерации, статистический и графический анализ материалов многолетних гидрометеорологических наблюдений, картографии и др. В результате проведенного исследования обоснованы и предложены методические положения по оптимальному зарегулированию стока малых рек бассейна р. Урал водохранилищами в пределах Российской Федерации с учетом эколого-экономических критериев. Они входят в состав обширного перечня предложений, направленных на гидролого-экологическое восстановление малых рек.

Ключевые слова: бассейн, река, Урал, районирование, водохранилище, зарегулирование, изменение, экологические, экономические, критерии.

DOI: 10.31857/S0321059624050102 EDN: VXEAIP

ВВЕДЕНИЕ

Методические положения определения оптимального количества, объемов прудов и водохранилищ в бассейнах малых рек с учетом их нормального функционирования в условиях маловодий и обеспечения нормативной водности в нижних звеньях гидрографической сети по бассейну р. Урал в пределах Российской Федерации

разработаны в рамках научно-исследовательской работы, выполненной в 2023 г. В качестве основополагающих нормативных, правовых и иных документов приняты природоохранные и водные законы РФ [2, 8–10, 13]. Требования к определению оптимального количества и объемов прудов и водохранилищ в бассейнах малых рек учитывают следующее:

1) обеспечение устойчивого функционирования естественных или сложившихся экологических систем, сохранение биологического разнообразия в малых реках и предотвращение негативных последствий создания прудов и водохранилищ в условиях изменения климата [12];

2) сохранение или улучшение состояния экологической системы в пределах водных объектов или их участков;

¹ Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы, заключенной между Институтом водных проблем РАН и Уфимским университетом науки и технологий Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта на выполнение прикладных научных исследований по теме “Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной реки Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)”, подписанного 30.03.2022.

3) сведение к минимуму риска необратимых негативных изменений в экологической системе водного объекта вследствие антропогенных воздействий;

4) обеспечение устойчивого и безопасного водопользования в процессе социально-экономического развития территории.

В соответствии с указанными положениями рекомендовано определение оптимального количества, объемов прудов и водохранилищ в бассейнах малых рек с учетом их нормального функционирования в условиях маловодий на основе применения целевых функций, учитывающих выделение минимума приведенных затрат и максимума экологической эффективности. Их рекомендуется применять при обосновании и проведении мероприятий по проектированию, строительству и эксплуатации прудов и водохранилищ с учетом различий физико-географических условий в пределах бассейна р. Урал [3, 7].

После утверждения в установленном порядке представленные методические положения могут быть использованы в связи со следующими действиями:

1) корректировкой схем комплексного использования и охраны водных объектов, водохозяйственных балансов; планированием водохозяйственных и водоохраных мероприятий по бассейнам малых рек;

2) государственным контролем и надзором за использованием и охраной водных объектов;

3) оценкой воздействия на окружающую среду (ОВОС) при разработке предпроектной и проектной документации на строительство прудов и водохранилищ на малых реках;

4) размещением, проектированием, строительством и реконструкцией прудов и водохранилищ, оказывающих влияние на состояние водных объектов и их экосистем;

5) решением других вопросов в области использования и охраны малых рек, а также необходимостью межгосударственного согласования принципов управления водопользованием и водоохраными мероприятиями в бассейне трансграничной р. Урал (Жайык) между Российской Федерацией и Казахстаном.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходной информации использованы: физико-географическое районирование бассейна р. Урал в пределах Российской Федерации, материалы многолетних гидрометеорологических наблюдений по станциям и постам Росгидромета, а также статистические материалы организаций и ведомств, специализирующихся в области управления водопользованием и охраной водных ресурсов в пределах изучаемой территории. Кроме того, использованы также материалы собственных изысканий и наблюдений, полученные в ходе исследования, проведенного в 2023 г., а также материалы предшествующих многолетних полевых изысканий и наблюдений (гранты РФФИ, Государственные задания Республики Башкортостан и др.).

На основе их анализа выявлено то, что в течение последних десятилетий — с 2000-х гг. по настоящее время — сформировалась довольно напряженная водохозяйственная и гидролого-экологическая обстановка в условиях влияния маловодной фазы, с одной стороны, и регионального отклика глобального потепления климата — с другой.

В соответствии с методическими положениями, оптимальные параметры размещения прудов и водохранилищ устанавливаются на основании оценки состояния водного объекта (малой реки) и его экологической системы с учетом необходимости сохранения и воспроизводства ихтиофауны, занимающей верхнюю иерархическую ступень в пищевой цепи гидробионтов в водном объекте, которые отражены в Водном кодексе Российской Федерации [2] и Федеральном законе “Об охране окружающей среды” [13].

Методические положения учитывают следующие виды воздействий:

1) изменение гидрологического режима малых рек, их морфометрических характеристик при строительстве и эксплуатации прудов и водохранилищ;

2) трансформацию экологических условий в водном объекте в связи с переходом речного режима в озерный;

3) изменение экологических условий в водных объектах и паводково-пойменных комплексах, выполняющих важную роль в сохранении и воспроизводстве ихтиофауны;

4) забор (изъятие) и количественное истощение водных ресурсов;

5) дополнительные потери водных ресурсов в результате испарения с поверхности прудов и водохранилищ.

Таким образом, методические положения включают следующие показатели: безвозвратное изъятие воды за определенный временной период (год, сезоны, месяцы) для наиболее критических условий по водности (95%-й обеспеченности); потери воды на дополнительное испарение с поверхности прудов и водохранилищ в условиях изменения климата; обеспечение экологического стока (ЭС) (попусков) с учетом нормального функционирования прудов и водохранилищ в условиях маловодий и обеспечения нормативной водности в нижних звеньях гидрографической сети по бассейну р. Урал в пределах Российской Федерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многообразие путей реализации экономических решений, а также разница объемов капиталовложений и эксплуатационных затрат на водоохраные сооружения обуславливают необходимость выбора оптимального варианта осуществления водоохранной деятельности. Таким образом, комплекс исследовательских, изыскательских, проектных и планируемых мероприятий должен отражать взаимодействие естественных и антропогенных факторов, изучаемых на стыке географических, экологических и экономических дисциплин. Физико-географические основы указанного комплекса отражают количественные и качественные характеристики воды водных объектов, формирование потребностей отраслей народного хозяйства в водоснабжении в зависимости от природных зон, районов и экологических условий в аквальных комплексах [3].

Остановившись на анализе научно-методических подходов к обоснованию нормативов воздействия на водные объекты, кроме [8], следует привести и работы [4–6]. В них в качестве основ-

ных приняты положения, отражающие необходимость выполнения расчетов лимитирующих составляющих речного стока, включая показатели среднегодовых расходов (объемов) воды разной обеспеченности, внутригодовое распределение речного стока в годы 95%-й обеспеченности по участку расположения пруда или водохранилища, экологических расходов (объемов) воды (попусков), критических расходов (объемов) воды, а также объемов допустимых безвозвратных изъятий воды в бассейне малой реки и др. В качестве методологической основы нормирования безвозвратного изъятия речного стока, установления ЭС и экологического попуска (ЭП) принимается принцип устойчивого функционирования экологических систем водных объектов и околотоводных экологических систем, сохранение условий естественного размножения организмов. С учетом изложенного в качестве экологических критериев, которые учитываются и используются при обосновании оптимальных параметров прудов и водохранилищ, мест их расположения, а также ЭП, ЭС и в оценке степени нарушенности экологических систем, приняты следующие:

— условия естественного размножения ихтиофауны в системе русло–пойма и пойменной растительности;

— уровень биологической продуктивности экологических систем;

— структура сообщества рыб, в том числе соотношение ценных и малоценных видов рыб, темпы их роста;

— видовое разнообразие организмов, смена сообществ животных и растений;

— состояние русла реки, поймы и др.

В них приведены также основные величины морфометрических и гидрологических показателей водотоков, площади затопления поймы; характеристики водного режима, русловых и пойменных нерестилищ (скорость течения, глубина, температура и др.); уровенный режим, соленость воды, площади нагула молоди и взрослых особей рыб; видовой состав, численность и биомасса планктонных и донных организмов, динамика численности популяций рыб, характеристики численности молоди конкретного года рождения (“урожайность” поколения), промысловый возврат (величина вылова рыб одного поколения в течение всего жизненного цикла), запасы и уловы промысловых рыб.

Одно из необходимых условий выполнения расчетов с учетом показателей количественного истощения (изъятия) — определение так называемых критических расходов $Q_{кр}$ и объемов воды $W_{кр}$ в водотоке. Кроме того, методика расчетов учитывает необходимость определения таких показателей, как исторические минимальные расходы $Q_{ист}$ и объемы $W_{ист}$ воды, объем допустимого безвозвратного изъятия $W_{ди}$ за год и отдельные периоды, которые выражаются так:

$$W_{ди} = W_{кр} - W_{ист}. \quad (1)$$

При этом $W_{ди}$ принимается постоянным для разной водности с объемом стока выше базового. В свою очередь, минимальный сток базового года W_6 , с которого можно начинать изъятие речного стока в количестве $W_{ди}$, рекомендуется рассчитывать по формуле

$$W_6 = W_{кр} + W_{ди}. \quad (2)$$

В качестве расчетных принимаются расходы воды в годы 95%-й обеспеченности, критических — 97%-й обеспеченности и исторических — 99%-й обеспеченности. В свою очередь, экологический сток учитывает распределение речного стока в годы 95%-й обеспеченности внутри года по месяцам, обеспечивая условия обитания и воспроизводства ихтиофауны в пределах расчетного участка реки.

Как показано выше, в качестве основных недостатков, имеющих в работах [4–6, 8], следует привести то, что в них не учтена пространственная дифференциация основных физико-географических условий (географического положения, орографии местности и др.), которые должны быть применены при обосновании оптимальных параметров гидротехнических сооружений.

Исходя из изложенного в данной, работе установлено положение, отражающее то, что эко-

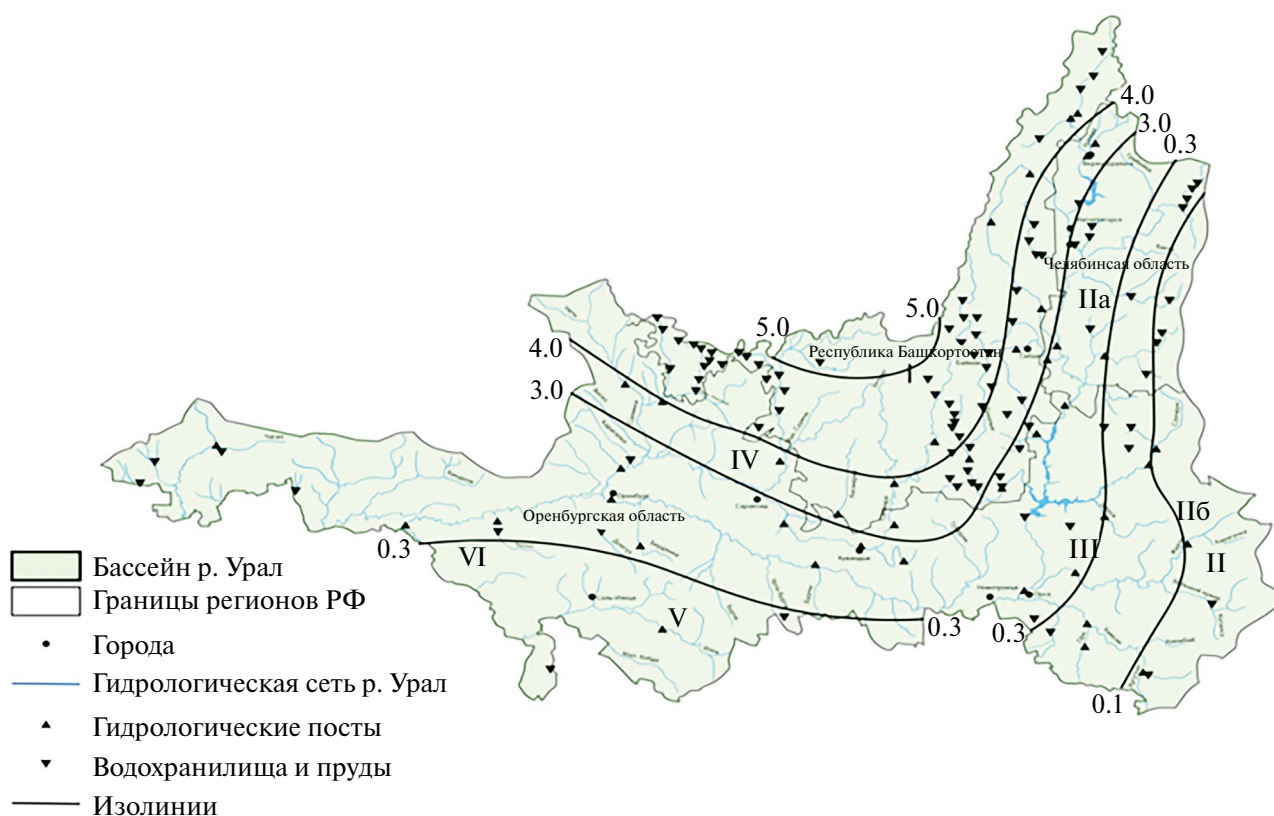


Рис. 1. Изолинии модулей стока среднегодовых расходов воды малых рек в годы 95%-й обеспеченности.

номические и экологические параметры функционирования как существующих, так и новых прудов и водохранилищ (если в их строительстве имеется объективная необходимость) должны учитывать следующее. Одно из основных требований — обоснование необходимого объема водохранилища, места его расположения с учетом привлечения минимальных приведенных затрат на его строительство и эксплуатацию в соответствии с требованиями целевых функций. Таким образом, подбор вида, конструкций и технического решения задачи должен проводиться на основе сравнительного подхода по двум или более независимым вариантам. Уравнение водохозяйственного баланса по створу расположения рекомендуемого водохранилища (пруда) должно учитывать: в приходной части — объем речного стока, поступающего с вышерасположенного участка W_p , полезный объем водохранилища W_p ; в расходной части — объем испарения воды с поверхности водного зеркала водохранилища W_i , величину безвозвратных изъятий $W_{ди}$, а также транзитный сток W_r , учитывающий объем воды, необходимый для поддержания экологических условий в водотоке ниже водохранилища (экологический попуск — W_y) и объем воды, необходимый для удовлетворения потребностей водопользования хозяйственными объектами и населенными пунктами, расположенными ниже по течению W_n .

Исходя из изложенного, оптимальный полезный объем водохранилища может быть рассчитан по формуле

$$W_p = W_i + W_{ди} + W_y + W_n - W_r. \quad (3)$$

При размещении самого (проектируемого) водохранилища должны учитываться физико-географические условия района, где планируется его строительство, в том числе орографические характеристики участка реки, ее долины, морфометрические параметры проектируемого водоема и др. В районах, характеризующихся большой изменчивостью речного стока в течение года, а также в многолетнем разрезе, предпочтительно строительство одного водохранилища многолетнего зарегулирования, исходя из необходимости удовлетворения целевым функциям как по экономическим, так и по экологическим параметрам по следующему выражению [3]:



Рис. 2. Районирование бассейна р. Урал по внутригодовому распределению стока [11].

$$\begin{cases} \Pi = I_3 + E_n K_3 \rightarrow \min \\ \Theta_{эф} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (4)$$

где Π — приведенные затраты, I_3 — эксплуатационные затраты, K_3 — капитальные затраты, E_n — коэффициент приведения, $\Theta_{эф}$ — показатель экологической эффективности.

Таким образом, задача оптимизации размещения водохранилищ должна решаться с учетом как экономической, так и экологической эффективности проводимых мероприятий.

В бассейнах рек, где условия рельефа (пологого) не позволяют размещать одно водохранилище с большим объемом, можно создать каскад из двух или более водохранилищ. При этом в засушливых районах в степной зоне оптимальное количество водоемов должно определяться с учетом дополнительных потерь воды на испарение с поверхности водоемов, так как в острозасушливые годы значительное количество накопленной в весеннее время воды будет расходоваться с их поверхности на испарение летом.

Эти потери здесь довольно высокие, могут быть сопоставимы с показателями изъятия воды на водопользование в расходной части водохозяйственного баланса.

Характеристики годового стока неизученных малых рек в годы 95%-й обеспеченности ориентировочно могут определяться по рис. 1. Более точные расчеты параметров стока могут быть проведены по аналогии с расчетами по изученным рекам. При этом в качестве аналога принимается изученная река, протекающая в том же физико-географическом районе, что и изучаемая [7]. Показатели внутригодового распределения речного стока в различные по водности годы, в том числе и очень маловодные, в качестве которых приняты показатели стока 95%-й обеспеченности, рекомендуется определять по справочному изданию [11]. Районирование изучаемой территории по внутригодовому распределению речного стока представлено на рис. 2.

Указанные закономерности учтены авторами статьи при составлении картосхемы района бассейна р. Урал (в пределах Российской Федерации) по условиям приоритетного размещения прудов и водохранилищ с учетом физико-географических характеристик и обитания гидробионтов.

С учетом изложенного следует констатировать то, что при проектировании прудов и водохранилищ на малых реках необходимо учитывать биологические особенности обитающих в них рыб. У весенне- и летнерестующих рыб инкубация икры продолжается в среднем до 7, иногда до 12 дней, в зависимости от температуры — чем ниже температура воды, тем больший срок требуется для развития эмбрионов. Повторяемость высоких половодий необходима не меньше, чем 1 раз в 3 года, а лучше 1 раз в 2 года. Весенние попуски воды должны совпадать по времени со сроками естественного половодья, к которым была изначально приспособлена местная ихтиофауна. Особенно это важно для фитофильных рыб, которые в этом случае смогут размножаться в привычных условиях, и нормальное пополнение их популяций новыми поколениями при этом будет обеспечено. Промыслового значения малые реки не имеют. Однако в горно-лесной и горно-лесостепной зо-

нах в силу их труднодоступности и наименьшей степени развития в них антропогенного прессинга они важны как рефугиумы, позволяющие наиболее чувствительным видам сохраняться в этих местообитаниях, а также находить пути миграций. Низкая численность части видов рыб малых рек — следствие не только антропогенного ухудшения экологических условий, но и их собственных биоэкологических характеристик, связанных со стенотермностью, оксифильностью, субстратным консерватизмом.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования обоснованы и предложены методические положения по оптимальному регулированию стока малых рек бассейна р. Урал водохранилищами в пределах Российской Федерации с учетом эколого-экономических критериев. Они входят в состав обширного перечня предложений различных мероприятий по гидролого-экологическому восстановлению малых рек. В их числе — обоснование мест расположения, оптимального количества и параметров водохранилищ в бассейнах малых рек с учетом особенностей нормального функционирования в условиях маловодий в нижних звеньях гидрографической сети — оно имеет ведущее значение. Соответственно, указанные методические положения разработаны в целях поддержания поверхностных и подземных вод в состоянии, соответствующем требованиям водного законодательства Российской Федерации, и могут быть применены при решении задач оптимального управления водохозяйственной деятельностью в бассейнах рек с учетом как хозяйственно-экономических, так и экологических критериев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. СПб.: ART-XPRESS, 2015. 41 с.
2. Водный кодекс Российской Федерации. Новосибирск: Сиб. университет. изд-во, 2010. 48 с.
3. Гареев А.М. Оптимизация водоохранных мероприятий в бассейне реки (географо-экологический аспект). СПб.: Гидрометеиздат, 1995. 190 с.
4. Дмитриева В.А. Экологический сток в речных потоках // Регион. системы. 2022. Т. 46. № 3. С. 424–433.

5. Дубинина В.Г., Косолапов А.Е., Коронкевич Н.И. и др. Актуализация методических указаний по нормированию допустимого безвозвратного изъятия речного стока и установлению экологического стока для сохранения водных экосистем // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 2. С. 16 – 26.
6. Дубинина В.Г., Никитина О.И. и др. Методические подходы к определению объемов допустимого безвозвратного изъятия стока из слабоизученных и малоизученных и малых рек // Вод. хоз-во России. 2015. № 4. С. 80–97.
7. Кадильников И.П. Физико-географическое районирование Башкирской АССР. Уфа, 1964. 210 с.
8. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. М.: МПР России, 2007. № 328. 38 с.
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2006 г. № 881 “О порядке утверждения нормативов допустимого воздействия на водные объекты”. Государственный комитет Российской Федерации по рыболовству, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.
10. Постановление Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2014 года о зонах затопления, подтопления. № 360. 7 с. С изменениями 17 августа 2022 г.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 12. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 512 с.
12. Фащевский Б.В. Основы экологической гидрологии. Минск: Экоинвест, 1996. 240 с.
13. Федеральный закон “Об охране окружающей среды” от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 2002. № 2. Ст. 133; 2004. № 35. Ст. 3607; 2005. № 1. Ст. 25; № 19. Ст. 1752; 2006. № 1. Ст. 10; № 52. Ст. 5498; 2007. № 7. Ст. 834; № 27. Ст. 3213.

METHODOLOGICAL PROVISIONS OF OPTIMAL REGULATION OF THE FLOW OF SMALL RIVERS OF THE URAL RIVER BASIN BY RESERVOIRS, TAKING INTO ACCOUNT ECOLOGICAL AND ECONOMIC CRITERIA

A. M. Gareev*, V. S. Goryachev

Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450074 Russian Federation

**e-mail: aufar.gareev@mail.ru*

Based on the analysis of the currently existing provisions applied in the management of water use in the river basins of the Russian Federation, taking into account the artificial regulation of river flow by reservoirs, it can be revealed that there are some flaws in them. For example, the guiding documents, including the “Methodological guidelines for the development of standards for permissible impacts on water bodies” the main characteristics of river basins that affect the conditions for the formation of river flow, the ecological and economic characteristics of the location and operation of reservoirs on small rivers, as well as indicators of the formation of additional water losses resources from their surface as a result of evaporation are not fully taken into account. This is primarily related to the basins of small rivers located in arid areas, which include the watercourses of the Ural River basin within its middle and lower parts. Taking into account the above, methodological provisions are proposed that, when designing and constructing reservoirs, provide for the need for a differentiated analysis of the physical and geographical conditions (geographical location, orography, water balance and other characteristics) of the territories where the basins of the studied rivers are located. This is of the greatest importance in the context of the formation of a regional response to global climate warming with the emergence of a set of adverse economic and environmental consequences.

The geosystem approach and the basin principle have been adopted as a methodological basis, which make it possible to comprehensively take into account the peculiarities of the influence of a combination of natural and anthropogenic factors on the formation of variability in quantitative and qualitative characteristics of watercourses and environmental conditions in them. The research methods include: physical and geographical zoning of the Ural River basin within the Russian Federation, statistical and graphical analysis of materials from long-term hydrometeorological observations, analogies, cartography, etc.

As a result of the conducted research, methodological provisions on optimal regulation of the flow of small rivers of the Ural River basin by reservoirs within the Russian Federation, taking into account ecological and economic criteria, are substantiated and proposed. They are part of an extensive list of proposals aimed at the hydrological and ecological restoration of small rivers, taking into account the need for various activities. In particular, the need to determine the optimal number and volume of small ponds and reservoirs in the basins of small rivers, taking into account their normal functioning in low-water conditions and ensuring regulatory water content in the lower links of the hydrographic network along the Ural River basin within the Russian Federation is of leading importance. Accordingly, these methodological provisions have been developed in order to maintain surface and groundwater in a condition that meets the requirements of the water legislation of the Russian Federation.

Keywords: basin, river, Urals, zoning, reservoir, overregulation, change, environmental, economic, criteria.

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-

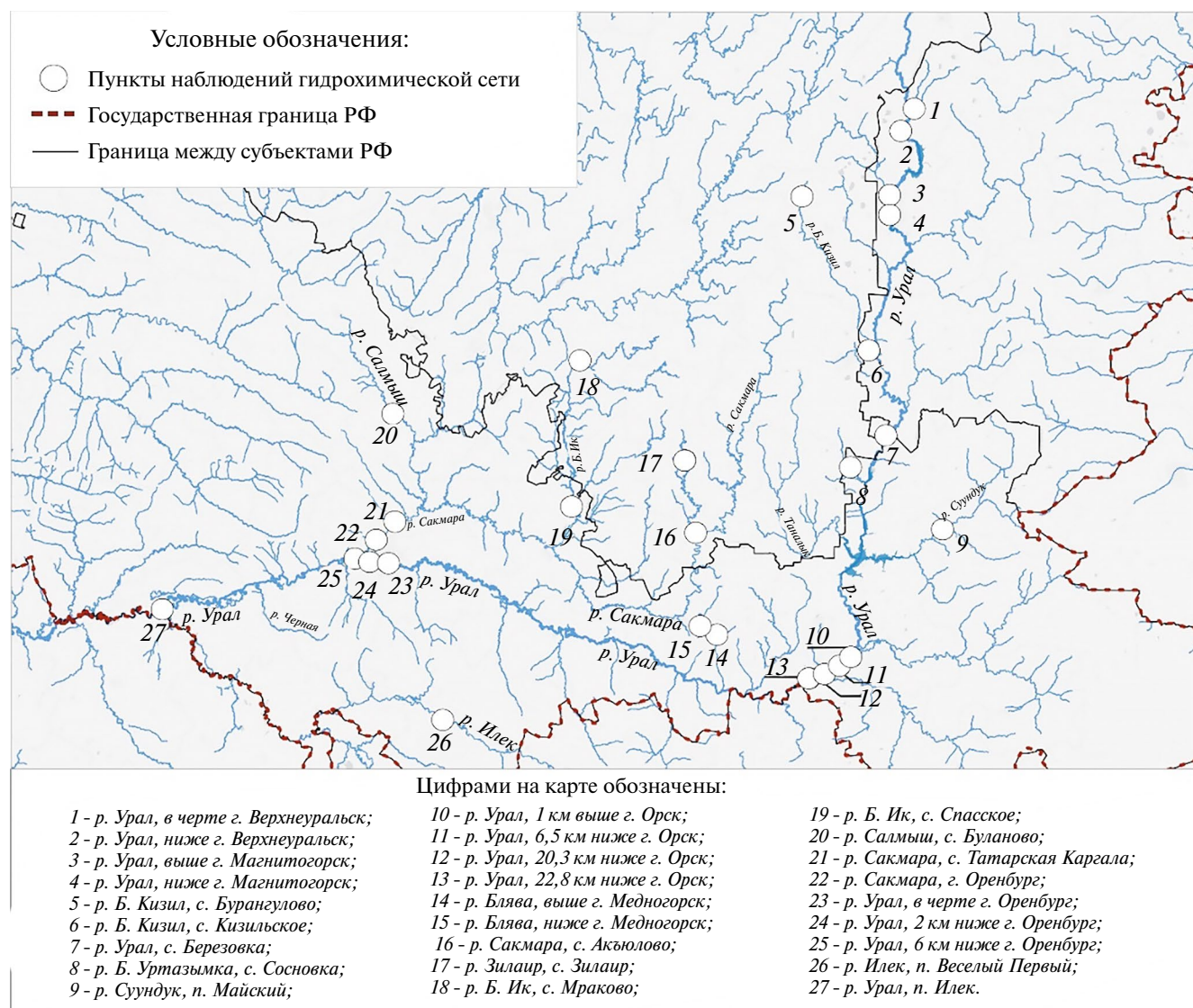


Рис. 1. Картограмма расположения гидрохимических пунктов наблюдений в бассейне р. Урал.

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 среднесреднеголетняя 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. Среднесреднеголетние 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 среднесреднегодовые 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. Среднесреднеголетнее 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 среднесреднегодовые

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. Среднесреднегодовое содержание фосфатов по длине р. Урал практически не меняется и к концу исследуемого периода близко к ПДК. Лишь в створе ниже г. Магнитогорска среднесреднегодовые 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 среднесреднегодовые 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 среднесреднегодовое содержание в речных водах **цинка** отмечается в верхнем течении р. Урал (рис. 2а). Ниже городов Орска, Оренбурга и п. Илек среднесреднегодовые концентрации снижаются до нормативных значений (10 мкг/дм^3). Экстремально высокое загрязнение речных вод цинком со среднесреднегодовыми концентрациями $> \text{ПДК}$ в 100 раз (в отдельные годы — 600 ПДК) наблюдается в р. Бляве ниже г. Медногорска. За исследуемый период отмечены положительные тренды среднесреднегодовых 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 среднесреднегодовых значений 0.1 мг/дм^3 (соответствует ПДК) (рис. 2б).

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

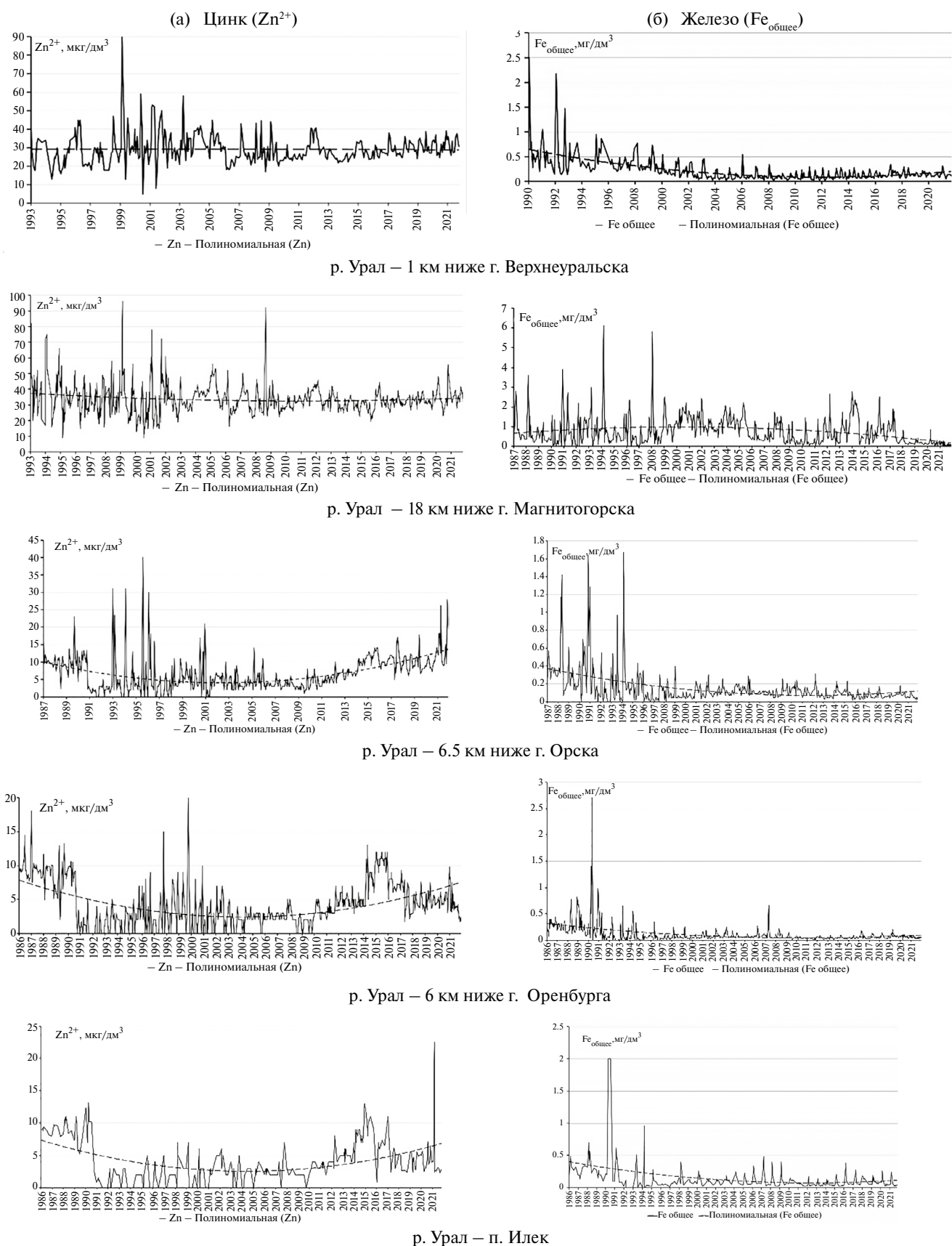
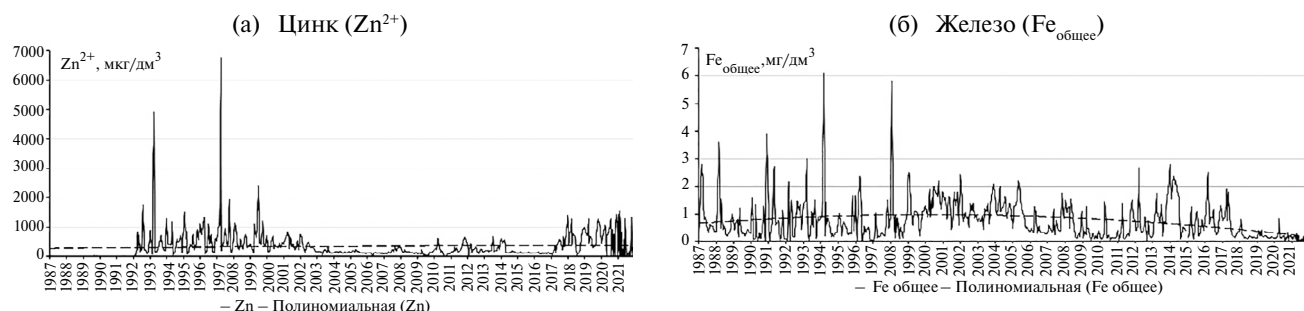


Рис. 2. Многолетняя динамика концентраций цинка (Zn^{2+}) (а) и железа ($Fe_{общее}$) (б) в бассейне р. Урал.



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.

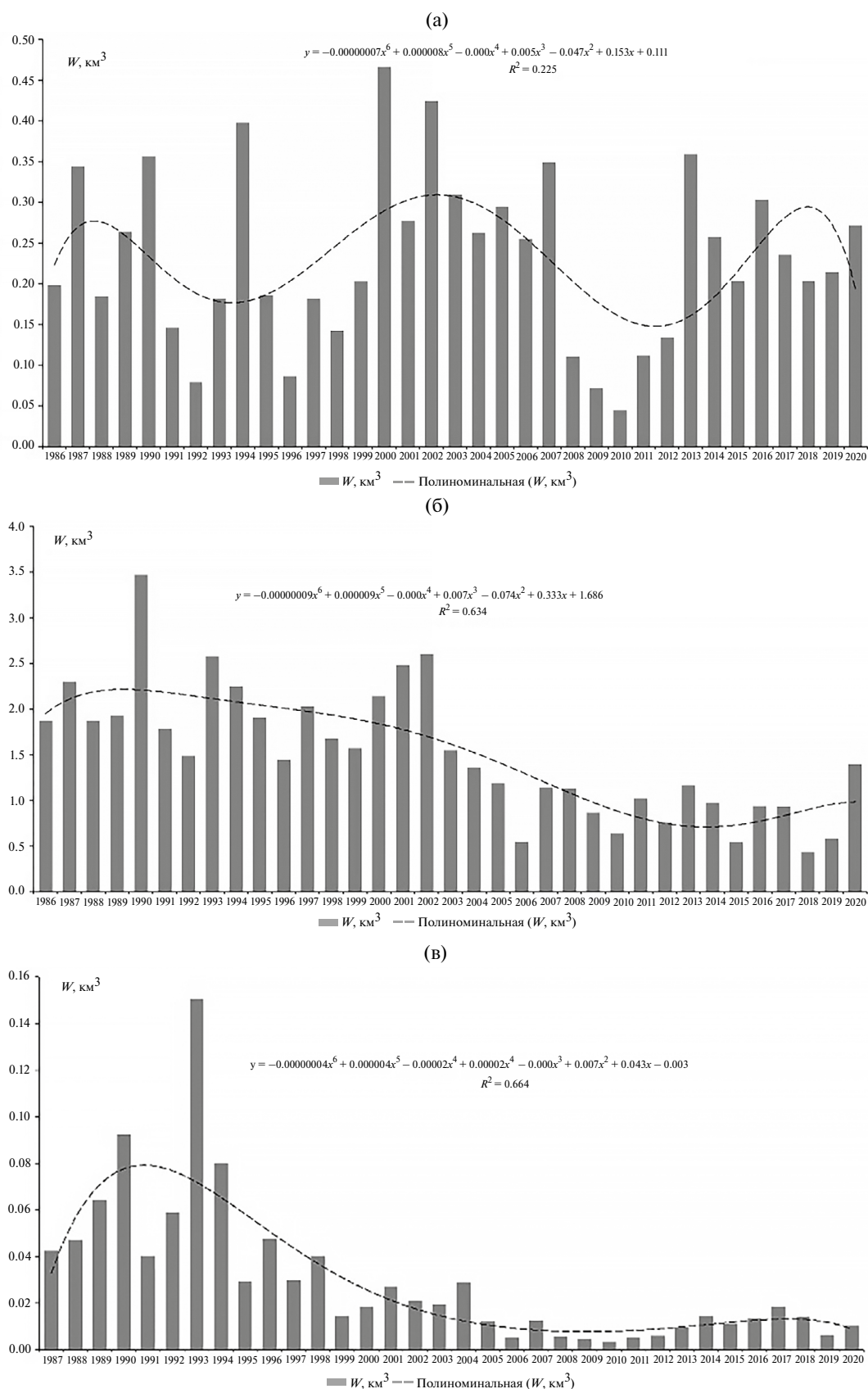


Рис. 3. Многолетние изменения объемов годового водного стока рек в бассейне р. Урал: (а) р. Урал – г. Верхнеуральск; (б) р. Большой Ик – с. Спасское; (в) р. Блява – г. Медногорск.

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. Среднемесячные 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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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/дм ³												
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 среднеемноголетних 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 среднеегодовые 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.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОДЫ НА ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ¹

© 2024 г. О. М. Розенталь^а, В. О. Полянин^а, Т. Н. Синцова^{б, *}

^а Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^б Горный институт УрО РАН, Пермь, 614007 Россия

*e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

Поступила в редакцию 01.02.2024 г.

После доработки 29.02.2024 г.

Принята к публикации 29.02.2024 г.

Трансграничный перенос загрязнений русловыми водными потоками создает эколого-экономические потери на территориях, расположенных ниже по течению рек. При этом очень серьезные проблемы возникают не только на водотоках, пересекающих государственные границы, но границы между отдельными субъектами одной страны. В первую очередь возникает проблема достоверности оценки качества вод в условиях существенной нестабильности гидрологического режима на основе действующих систем мониторинга. Данная задача рассматривается на примере трансграничной р. Урал. Предложен алгоритм формирования конструктивного диалога между заинтересованными сторонами путем учета статистических характеристик результатов измерений, полученных на соседних створах гидрохимического наблюдения. Показана целесообразность учета с этой целью порога различимости контролируемых показателей, оценки и регулирования ошибок 1-го и 2-го рода. Продемонстрирована возможность установления экономических потерь из-за отсутствия конструктивных отношений сторон в части оценки контролируемых показателей.

Ключевые слова: качество воды, трансграничные водные объекты, загрязняющие вещества, река Урал.

DOI: 10.31857/S0321059624050125 **EDN:** VWZYSX

ВВЕДЕНИЕ

Основной канал миграции загрязняющих веществ во внутриконтинентальных водных системах — их перенос русловыми водными потоками [8, 13], создающий значительные сложности водопользования на территориях, расположенных ниже по течению рек в случаях высокого загрязнения вод на вышерасположенных участках. Это особенно нежелательно, если отходы из одной страны перемещаются через границу и подвергаются отрицательному воздействию водные экосистемы другой страны, создавая здесь экологические и экономические ущербы, требующие политического урегулирования. Поэтому важное значение имеет объективность оценки качества воды в контрольных створах, фиксация их в ответствующих межгосударственных соглаше-

ниях в области гидрометеорологии, обеспечение сопоставимости системы контроля качества вод на трансграничных реках, недопустимость их сверхнормативного загрязнения из-за функционирования промышленных и сельскохозяйственных комплексов, расположенных выше по потоку. В частности, эта проблема очень актуальна для оценки миграции загрязняющих веществ между Россией и Казахстаном в бассейне р. Урал, где развиты нефтегазохимическая, металлургическая и другие водоемкие отрасли промышленности, а также производство сельскохозяйственной продукции.

Корректный подход к решению задач совместного управления трансграничными водными ресурсами необходим, потому что достоверность измеренных показателей качества природных вод не может быть абсолютной вследствие, как минимум, двух причин:

— погрешности (или неопределенности) каждого выполненного измерения концентрации разных загрязняющих веществ $\pm (20 \div 80)\%$ от установленного норматива;

¹ Работа выполнена в рамках Государственного контракта “Экологическая оценка последствий регулирования стока в трансграничном бассейне трансграничной р. Урал (Жайык) и разработка научно-обоснованных предложений по экологической реабилитации, сохранению и восстановлению трансграничной реки Урал (Жайык)”.

— отклонения результатов исследования проб воды вследствие случайного характера контролируемых показателей от их средних значений (отличия выборочной совокупности данных от средних характеристик генеральной совокупности) [5, 16, 17].

Условием устойчивого водопользования в данном случае являются рекомендации, сформированные на основе предлагаемого в данной работе анализа результатов измерений концентраций загрязняющих веществ в воде.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СТАТИСТИКИ ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Численные значения гидрохимических показателей качества воды являются в общем случае случайными величинами, в то же время при этом для решения очень широкого круга прикладных задач необходимы их точечные оценки. В связи с этим возникает серьезная проблема — построение таких точечных показателей, которые характеризуются максимальной устойчивостью, наименьшей дисперсией при заданном объеме выборки.

Традиционно для этих целей используется среднеарифметическое значение, однако эта оценка наиболее эффективна, только если рассматриваемая выборка имеет распределение, близкое к нормальному, и не характеризуется наличием “тяжелых” хвостов.

В то же время содержание консервативных ингредиентов в водотоках в первую очередь определяется сопряжением двух, как правило, независимых процессов — интенсивностью поступления в водный объект загрязняющих веществ q , г/с, и расходом воды водотока-приемника Q , м³/с, при этом при полном перемешивании $C(t) \sim q(t)/Q(t)$.

При этом характер распределения процесса $C(t)$ определяется распределением процессов $q(t)$, $Q(t)$ [11]. Так, в простейшем случае, если колебания $q(t)$ и $Q(t)$ описываются нормальным распределением, то распределение $C(t)$ должно описываться распределением Коши, для кото-

рого оценки среднеарифметического значения являются несостоятельными. При этом, как показано в [18, 21], их несостоятельность начинает явно проявляться при $Cv \geq 1$. В то же время, если $Cv \ll 1$, то распределение $C(t)$ весьма близко к нормальному. Поэтому все представленные в работе параметрические оценки в строгой постановке корректны только при нормальном распределении гидрохимических показателей качества воды.

В связи с этим проблема корректности оценок качества воды на пограничных — межгосударственных створах приобретает особую актуальность. Так как эффективность точечных оценок принципиально зависит от характера статистического распределения рассматриваемых выборок, если априорно оно не известно, то, как отмечал А.Н. Колмогоров еще в 1934 г. [11], в этом случае эффективнее всего использовать вместо среднеарифметического значения их медиану, т. е. квантиль порядка 50%.

Так как статистические характеристики качества воды в водотоках, как правило, характеризуются значительной как пространственной, так и временной неоднородностью, то корректное сопоставление этих величин можно проводить, если рассматриваемые выборки были получены в близких однородных точках опробования за идентичный период. В противном случае возникает весьма сложная проблема оценки пространственно-временных неоднородностей рассматриваемых показателей качества воды. При этом необходимо учитывать, что определение химических показателей качества воды вряд ли чисто технически проводится разными лабораториями на основе разделения единых проб воды. В связи с этим наряду с чисто метрологическими вопросами анализа лимитирующих показателей качества воды возникает проблема пространственной и временной изменчивости данных показателей при их относительно небольшом времени осреднения.

Характерное время отбора пробы воды при выполнении батиметрической съемки составляет ~ 100 с, при этом происходит практически точечный отбор проб $L_{oc} \sim 0.1$ м. Возникает принципиальная задача — насколько объективно качественные характеристики получены при

таких пространственно-временных масштабах осреднения, насколько корректно можно характеризовать качество воды в створе, по крайней мере за суточный интервал, при котором гидрологические характеристики могут считаться за пределами паводковых периодов постоянными. Характерные внутрисуточные колебания показателя (удельной электропроводности) химического состава воды в водном объекте представлены на рис. 1.

Метрологическая погрешность измерения данного показателя составляет $\sigma < 10\%$. Эффективность данного очень удобно измеряемого показателя качества воды состоит в первую очередь в том, что он очень тесно связан с общей минерализацией воды. Для р. Камы в районе г. Березники Пирсоновский коэффициент корреляции между удельной электропроводностью воды и ее общей минерализацией составляет $R^2_{\text{КС}} \sim 0.94$. Как следует из рис. 1, суточный размах его относительного изменения $\Delta = 2|(C_{\text{max}} - C_{\text{min}})/(C_{\text{max}} + C_{\text{min}})| > 40\%$.

Возникает вопрос: как и насколько объективно единичная проба может характеризовать даже суточную динамику гидрохимических показателей качества воды. При этом временная неоднородность динамики гидрохимических показателей, как и их пространственная неоднородность, существенно влияет на их распределение по поперечному сечению водотока. Поэтому при сопоставимости гидрохимических показателей

качества воды поверхностных водотоков можно, как минимум, выделить следующие аспекты:

- масштабы пространственно-временной однородности рассматриваемых показателей качества воды;

- для обеспечения корректной оценки необходимо, чтобы $L_c < L_{\text{мет}}$, $T_c < T_{\text{мет}}$, где L_c – характерный пространственный масштаб неоднородности распределения показателя качества воды; $L_{\text{мет}}$ – метрологический масштаб осреднения при измерении рассматриваемых показателей качества воды; T_c – характерное время масштаба временной неоднородности; $T_{\text{мет}}$ – временной масштаб осреднения при проведении измерений качества воды;

- статистические аспекты, оценка вероятностей наблюдаемых экстремальных значений, при этом параметрические методы статистического анализа корректно могут использоваться только при априорном допущении нормальности распределения рассматриваемых показателей.

Учитывая важность и серьезность рассматриваемой проблемы на трансграничном участке водных систем, необходимо переходить на автоматические системы контроля качества воды.

Фундаментальная проблема использования статистических методов в оценке качества воды состоит в том, что необходимо установление пространственно-временных масштабов, когда оцениваемые показатели являются состоятельными. При приемлемости данного требования следует рассматривать вероятность наблюдений, когда динамика рассматриваемых показателей качества воды представляет собой однородную выборку, состоящую из статистически не связанных между собой членов, подчиняющуюся нормальному закону распределения. При этом необходимо подчеркнуть, что концепция приемлемого риска не является до сих пор не только основой планируемой водоохранной деятельности, но и экологической безопасности в целом.

До сих пор нет конкретных указаний, с какой надежностью должны соблюдаться нормативные требования к качеству воды в зависимости

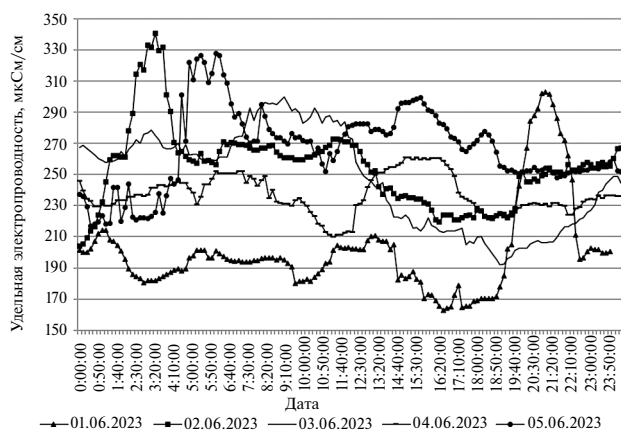


Рис. 1. Хронологические графики изменения удельной электропроводности воды в Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники в июне 2023 г. на глубине 6 м при частоте измерения 6/ч, или 1 измерение в 10 мин.

от вида водопользования. Формально все действующие нормативы качества воды исходят из концепции абсолютной надежности, т. е. абсолютного недопущения превышения нормативных требований.

По косвенным оценкам, например по действующим требованиям по установлению НДС [12], требования непревышения $C_{плк}$ в контрольном створе должны соблюдаться при минимальном месячном расходе воды года 95%-й обеспеченности. Из этого требования можно заключить, что для месячного интервала надежность соблюдения нормативных требований должна составлять 95%. Однако такое заключение корректно, только если допустить, что снижение содержания загрязняющих веществ происходит только вследствие процессов разбавления, интенсивность которых пропорциональна расходу воды.

Методы математической статистики в гидрохимическом исследовании в первую очередь необходимы и должны быть направлены на следующее:

- на обеспечение требуемой надежности функционирования систем водопользования по показателям качества воды;
- на оценку сопоставимости результатов нескольких параллельно функционирующих систем мониторинга, что принципиально важно для организации систем наблюдения за состоянием трансграничных рек.

При этом нет фундаментальных доказательств, что все статистические оценки химических показателей качества воды водных объектов не только безусловно состоятельны, но и описываются нормальным законом распределения.

В то же время допущение “нормальности” распределения рассматриваемых показателей качества воды принципиально упрощает все статистические процедуры.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ
ТРАНСГРАНИЧНОЙ РЕКИ УРАЛ

Для получения достаточно объективных оценок выполнен статистический анализ результатов измерений показателей качества воды бассейна р. Урал, которые в 2020–2022 гг. проводили:

- с казахской стороны – Комплексная лаборатория мониторинга загрязнения природной среды филиала РГП “Казгидромет” по Актыбинской области;
- с российской стороны – Испытательная лаборатория Оренбургского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала Приволжского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Типичные полученные результаты демонстрируют высокую пространственно-временную

Таблица 1. Сопоставление среднеарифметических и среднеквадратических значений концентраций некоторых веществ в воде бассейна р. Урал

Показатель	Хлорид-ион	Сульфат-ион	Ca	$NH_4 + NH_3$	NO_2	NO_3	<i>N</i> сумм	Фосфат-ион	Fe _{общ}
Данные Казахстана									
Среднеарифметическое значение	137	62.000	63.714	1.439	0.011	1.310	1.455	0.019	0.069
Среднеквадратическое отклонение	79.282	28.461	28.710	0.373	0.005	1.608	0.376	0.013	0.073
Коэффициент вариации	0.58	0.46	0.45	0.26	0.45	1.2	0.26	0.68	1.06
Данные России									
Среднеарифметическое значение	224.1	131.5	69.20	0.29	0.01	0.64	0.95	0.04	0.13
Среднеквадратическое отклонение	173.2	39.05	21.03	0.24	0.02	0.68	0.74	0.04	0.16
Коэффициент вариации	0.77	0.30	0.30	0.83	2.0	1.06	0.78	1.0	1.2

вариабельность контролируемых показателей, как это следует из табл. 1.

Как видно по табл. 1, российской части бассейна р. Урал свойственно повышенное содержание в воде хлоридов, сульфатов, фосфатов, вероятно, входящих в состав соединений железа, меди, цинка, никеля и хрома. Во всех случаях обнаружен повышенный коэффициент вариации, в отдельных случаях он ≥ 1.0 . Таково следствие выраженной вариабельности контролируемых показателей, как это видно из рис. 2.

Из рис. 2 следует, что если бы выводы о качестве воды делались по результатам первых девяти месяцев 2020 г. или последних четырех месяцев 2021 г., то можно было бы считать, что концентрация железа — ниже предельно допустимой (ПДК = 1 мг/дм³), но по результатам всего ряда наблюдений такого вывода сделать нельзя. В противном случае в соответствии с ФЗ-102 “Об обеспечении единства измерений” имеет место “частичное игнорирование обстоятельств” [19], что, в соответствии с Арбитражным процессуальным кодексом РФ, является основанием “недоказанности имеющих значение обстоятельств” [3]. Таково правило, в равной мере касающееся также цинка и меди (рис. 2) и других загрязняющих воды бассейна р. Урал веществ.

Как видно из представленных результатов, трудности формирования конструктивных водных отношений сторон, контролирующих трансграничный перенос воды, возникают по причине плохой различимости соответствия или

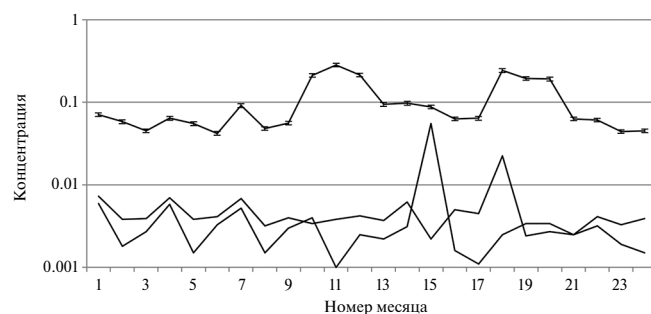


Рис. 2. Концентрация (мг/дм³) железа (верхняя линия), цинка (средняя по большинству данных) и меди (нижняя) в 2020–2021 гг. на створе Веселый Первый притока Илек р. Урал по данным Оренбургского ЦГМС в логарифмическом масштабе.

несоответствия контролируемых показателей установленным требованиям, тем более что выводы опираются на результаты выборочных измерений, выполняемых через периоды, намного более длинные, чем время, в течение которого состав воды может измениться от соответствующего установленным нормативам до сверхнормативного. Соответственно, результаты измерительного контроля могут быть ошибочными.

Учет последнего обстоятельства требует, чтобы результат каждого измерения рассматривался как величина случайная, а заключение — как предположение, достоверность которого оценивалась бы по правилам, известным в прикладной математической статистике как проверка гипотез [2, 10].

Выборочный контроль

В наиболее простом случае проверяется гипотеза о том, что математическое ожидание концентрации C загрязняющего воду вещества нормально распределенной совокупности значений не превышает установленный норматив (ПДК): $\bar{C} \leq \text{ПДК}$. Здесь несмещенная выборочная оценка среднего составляет $\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$ (n — объем выборки, C_i — результат i -го измерения) и подчиняется нормальному закону распределения вероятностей с дисперсией σ^2 .

Различие экспериментальных и действительных результатов определяется стандартным нормальным распределением $\frac{\bar{C} - C}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \rightarrow u(0;1)$, ха-

рактеризующим вероятностную меру близости действительных и измеренных значений контролируемой величины.

Последнее выражение позволяет сформулировать нулевую гипотезу H_0 : $C \leq \text{ПДК}$, — означающую, что для данного контролируемого показателя установленные требования выполняются в виде:

$$\frac{\bar{C} - \text{ПДК}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq u_{1-\alpha}, \quad (1)$$

где $u_{1-\alpha}$ — квантиль стандартного нормального распределения, α — уровень значимости, характеризующий ошибку 1-го рода, означающую, что удовлетворительный состав речной воды будет ошибочно воспринят как неудовлетворительный.

Правило $C \leq \text{ПДК}$ гарантированно выполняется, только если $\bar{C} \ll \text{ПДК}$, так что разность между этими величинами намного превышает σ . На практике это неравенство нередко нарушается при $\bar{C} \rightarrow \text{ПДК}$.

При $\bar{C} > \text{ПДК}$ вводится альтернативная гипотеза H_1 , характеризующая ошибку 2-го рода β , означающую, что неудовлетворительный состав речной воды будет ошибочно воспринят как удовлетворительный. Здесь $C = \text{ПДК} + \delta$ (δ — порог различимости введенных гипотез) и выполняется неравенство:

$$\frac{\bar{C} - \text{ПДК}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} > u_{\beta}. \quad (2)$$

Увеличение β является характеристикой сближения значений $\bar{C}$ и ПДК, в данном случае — со стороны повышенных значений $\bar{C} > \text{ПДК}$. При этом имеется так называемая “область неразличимости” введенных статистических гипотез, предельное значение которой следующее:

$$u = u_{1-\alpha} - u_{\beta}, \quad (3)$$

где $u = \delta\sqrt{n}/\sigma$. Отсюда полный порог различимости $\delta = \sigma/\sqrt{n} (u_{1-\alpha} - u_{\beta})$.

Следовательно, если проверяется гипотеза

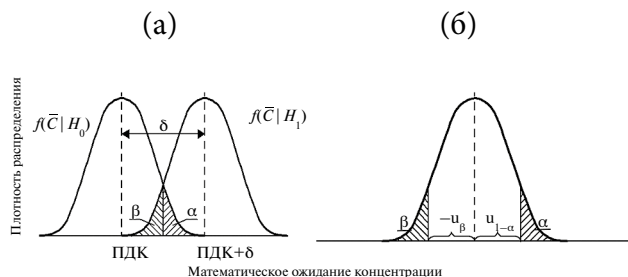


Рис. 3. Иллюстрации к задаче о принятии альтернативной гипотезы (а), к оценке достоверности информации (б).

о том, что $C = \text{ПДК}$, то с вероятностью β может быть верна гипотеза $C = \text{ПДК} + \delta$ (рис. 3а), так что граничное правило принятия альтернативной гипотезы есть

$$\frac{\bar{C} - \text{ПДК} - \delta}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} = u_{\beta}. \quad (4)$$

Нетрудно видеть (рис. 3б), что разность $u_{1-\alpha} - u_{\beta}$ соответствует вероятности $1 - (\alpha + \beta)$, т. е. величине, которая в литературе [1, 9] рассматривается как “интуитивно очевидный” показатель достоверности заключений контролирующего органа. Ограниченность такого подхода связана с тем, что в данной постановке задачи не учитывается нелинейный характер зависимостей $u_{1-\alpha} = f_1(\alpha)$, $u_{\beta} = f(\beta)$ и взаимосвязь α и β .

ПРИМЕР 1

На створе 1 (п. Целинный) вода по концентрации в ней хрома общего в 2015–2018 гг. соответствует установленным требованиям. Вычислить, каким образом будут изменяться ошибка 2-го рода на створе 2 (здесь — риск водопотребителя (п. Веселый Первый)) и порог различимости при снижении ошибки 1-го рода (риска контроля на вышерасположенном створе) до уровня значимости $\alpha = 0.05$ или 0.01 , если $\alpha = \beta = 0.1$.

Решение

Если $\alpha = \beta = 0.1$, то $\delta\sqrt{n}/\sigma = 2 \times 1.28 = 2.56$. Пусть, однако, нулевая гипотеза может быть принята только на уровне значимости $\alpha = 0.05$, так что $u_{1-\alpha} = 1.645$. Для того, чтобы сохранить вышеприведенное значение $\delta\sqrt{n}/\sigma$, необходимо принять $u_{\beta} = -0.915$, при котором $\beta = 0.18$, т. е. с уменьшением значения α в 2 раза значение β возрастает в ~ 1.8 раз. По линейной зависимости $1 - (\alpha + \beta)$ величина β должна была бы возрасти в 1.5 раза и составить 0.15. При этом $\delta\sqrt{n}/\sigma_0$ составило бы значение 2.682. При $\alpha = 0.01$ ($u_{1-\alpha} = 2.327$) и при нелинейном подходе $u_{\beta} = -0.233$, $\beta = 0.41$. А при линейном подходе и фиксированной величине $1 - \alpha - \beta$ имеем: $1 - \beta = 0.19$ и $\delta\sqrt{n}/\sigma = 3.205$. Таким образом, условием наименьшего значения $\delta\sqrt{n}/\sigma$ является равенство ошибок 1-го и 2-го рода, а нелинейный подход обеспечивает меньший порог различимости между нулевой

и альтернативной гипотезами, однако — большее значение величины β .

Заметим также, что величина $\delta\sqrt{n}/\sigma = u_{1-\alpha} - u_{\beta}$, характеризующая порог различимости выборочного контроля, напрямую зависит от квантилей u_{α} , u_{β} , а не от вероятностей α , β , которые, вообще говоря, не являются независимыми, поскольку увеличение α приводит к снижению β и наоборот. Поэтому в качестве показателя достоверности выборочного контроля скорее, чем величину $1 - (\alpha + \beta)$, можно было бы рассматривать $\delta\sqrt{n}/\sigma$, хотя и это вызывает сомнения, так как $\delta\sqrt{n}/\sigma = 0$ при $\alpha = \beta = 0.5$ (т. е. при принятии решения $\bar{C} = \text{ПДК}$ без учета погрешности измерений). Тем не менее использование $\delta\sqrt{n}/\sigma$ полезно в качестве характеристики погрешности статистического решения, “разделение” которой на слагаемые, зависящие от α и β , можно проводить на основе сопоставления потерь, связанных с рисками поставщика (п. Целинный) и потребителя (п. Веселый Первый). В теории проверки статистических гипотез условие (3) обычно используют для обоснования объема выборки n . При этом легко обосновать экономически доступный и экологически приемлемый объем выборки.

Случай единичного измерения

Пусть проведено измерение, результат которого описывается законом распределения $C \sim f(C_i, \sigma^2)$, и установлена граница допуска ПДК. Тогда “строгое” ограничение имеет вид $C_i - \text{ПДК}$, а “нестрогое” — $C_i \leq \text{ПДК}$. Последнее неравенство принято в современной практике контроля, но недоучитывает ошибок, возникающих из-за погрешности измерений и изменчивости контролируемых показателей. Безошибочное правило гласит, что соответствие соблюдается “если нижняя граница доверительного интервала не выше номинального значения” — ГОСТ 34100.3-2017 [7]. При этом решающее правило имеет вид:

$$\frac{C_i - \text{ПДК}}{\sigma} \leq u_{1-\alpha}. \quad (5)$$

Следовательно, нулевая гипотеза принимается, если $C_i - \text{ПДК} \leq \sigma \times u_{1-\alpha}$ и контрольный допуск расширяется на величину $\sigma u_{1-\alpha}$. В этом случае увеличение уровня значимости α , сужающее допуск $C_i - \text{ПДК}$, выгодно пользователю воды,

Таблица 2. Квантили $u_{1-\alpha}$ стандартного нормального распределения

α	0.01	0.05	0.10	0.1587	0.50
$u_{1-\alpha}$	2.326	1.645	1.282	1.0	0.0

а уменьшение — органу контроля, заинтересованному в увеличении допуска, который, например, при $\alpha = 0.01$ превышает 2σ (табл. 2).

В рассматриваемом случае нестрогого ограничения ошибку 2-го рода β можно определить, задав альтернативную гипотезу H_1 : $C_i > \text{ПДК}$ или (в пределе) $C_i = \text{ПДК} + \delta$. Поэтому предельное правило принятия этой гипотезы имеет вид:

$$\frac{C_i - \text{ПДК} - \delta}{\sigma} = u_{\beta}, \quad (6)$$

откуда с учетом (4) при $n = 1$ получим соотношение:

$$\frac{\delta}{\sigma} = u_{1-\alpha} - u_{\beta} = u_{1-\alpha} + u_{1-\beta}. \quad (7)$$

Если задается строгое ограничение $C_i < \text{ПДК}$, то решающее правило принятия гипотезы $C_i = \text{ПДК}$ уже имеет вид

$$\frac{C_i - \text{ПДК}}{\sigma} = u_{\alpha}. \quad (8)$$

Соответственно, при изменении уровня значимости риски заинтересованных сторон будут противоположны полученным выше для нестрогого ограничения. В целом при попадании результатов измерений в зону $\pm \sigma u_{1-\alpha}$ достоверность информации о составе воды характеризуется величиной $\pm \delta/\sigma$.

Изменяется альтернативная гипотеза, и вместо

$$(6) \text{ имеем: } \frac{C_i - \text{ПДК} + \delta}{\sigma} = u_{1-\beta} \text{ или с учетом (8):}$$

$$\frac{\delta}{\sigma} = -(u_{1-\alpha} + u_{1-\beta}), \quad (9)$$

где δ показывает, насколько C_i должно быть меньше ПДК для решения задачи о соответствии воды установленным требованиям.

Задача контролирующих органов — исследование вероятности нарушения требований. Тогда нулевая гипотеза приобретает вид $C_i = \text{ПДК}$,

а альтернативная $C_i < \text{ПДК}$ или $C_i = \text{ПДК} - \delta$. Соответственно, ошибка 1-го рода α определяет вероятность принятия решения $C_i < \text{ПДК}$, если на самом деле $C_i \geq \text{ПДК}$, т. е. является риском органа контроля. Аналогично, ошибка 2-го рода β определяет риск водопользователя. Подобное расчетное соотношение условий различимости, при которых гипотеза H_1 принимается, когда $C_i < \text{ПДК}$ на величину δ , выгодно ответственному за качество воды пользователю на створе 2, но не выгодно для створа 1.

ПРИМЕР 2

Используя результаты исследования 30 проб (табл. 3, створ Веселый Первый) в 2015–2018 гг. выяснить, соответствовало ли в среднем содержание хрома общего в воде створа п. Целинный установленным требованиям. Сравнить достоверности заключений, получаемых с учетом и без учета контрольных допусков в случаях строгого и нестрогого ограничений значений контролируемого показателя.

Решение

Согласно данным табл. 3, средняя концентрация хрома – 69.5 мкг/дм³, $\sigma = 34.5$ мкг/дм³. В соответствии с приложением к приказу Минсельхоза от 13.12.2016 № 552 (с изменениями от 10.03.2020) ПДК хрома трехвалентного – 0.07 мг/дм³, шестивалентного – 0.02 мг/дм³ для рыбохозяйственных водоемов. Пусть с учетом правил [15] и решения главного государственного санитарного врача по Оренбургской области принято ПДК = 0.06 мг/дм³ для хрома общего.

При нестрогом ограничении $C_i \leq \text{ПДК}$ и $\alpha = 0.05$ контрольный допуск следует расширить на величину $\sigma u_{1-\alpha} = 34.5 \times 1.64 = 56.6$. Поэтому принимается решение о преобладающем соответствии воды установленным требованиям, так как этому условию не удовлетворяет только одна (10-я) проба из 30. Если при этом также $\beta = 0.05$, то порог различимости составляет $\delta/\sigma = 2 \times 1.64 = 3.28$, так что $\delta = 11.3$, т. е. возможно увеличение концентрации по сравнению с ПДК почти в 2 раза. В отличие от этого, при строгом ограничении $C_i < \text{ПДК}$ принимается решение о несоответствии, так как только 2 пробы удовлетворяют установленным требованиям. Без учета допуска устанавливается, что в данном случае ПДК < $\bar{C}$ ($60 < 69.5$) и делается вывод о несоответствии воды установленным требованиям. Ошибочная оценка содержания хрома в воде, сделанная при нестрогом ограничении, – $1/30 \sim 0.03$, а при строгом – $2/30 \sim 0.06$.

Наиболее корректно здесь оперировать не среднеквадратическим значением генеральной совокупности, а его оценкой

Примечание 1 к примеру 2

Наиболее корректно здесь оперировать не среднеквадратическим значением генеральной совокупности, а его оценкой

$$(S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (C_i - \bar{C})^2}) \text{ и учесть, что случайная величина } \frac{\bar{C} - \text{ПДК}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \text{ имеет не нормальное распределение, а } t\text{-распределение Стьюдента. Однако при } n = 30 \text{ различие между этими распределениями незначительно. Например, для } \alpha = 0.05: u_{1-\alpha} = 1.644, \text{ а } t_{1-\alpha} = 1.69. \text{ Поэтому для упрощения расчета ограничиваемся нормальным распределением и принимаем, что выборочное среднеквадратическое есть } \sim \sigma.$$

Для оценки достоверности информации о качестве контроля в целом используют среднее значение контролируемого показателя за определенный период времени. Тогда для нестрогого ограничения имеем $\frac{\bar{C} - \text{ПДК}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq u_{1-\alpha}$, и для рассматриваемого примера $(69.5 - 60)/(34.5/\sqrt{30}) = 1.51 < 1.64$, т. е. в среднем решение о соответствии

Примечание 2 к примеру 2

Для оценки достоверности информации о качестве контроля в целом используют среднее значение контролируемого показателя за определенный период времени. Тогда для нестрогого

$$\text{ограничения имеем } \frac{\bar{C} - \text{ПДК}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq u_{1-\alpha}, \text{ и для рассматриваемого примера } (69.5 - 60)/(34.5/\sqrt{30}) = 1.51 < 1.64, \text{ т. е. в среднем решение о соответствии}$$

Таблица 3. Результаты измерений

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
C_i	60.8	46.5	79.6	13.9	113	115	115	87	96	123	115	97.3	77.6	18.7	48.1
i	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
C_i	45.8	95.7	115	73.2	73.1	59.9	64.7	40.2	106	85.6	25.1	9.8	16.1	37.1	51.9

ствии положительно, причем если $\beta = 0.05$, то $\delta = \sigma \times 2 \times 1.64/\sqrt{31} \approx 2$.

Таким образом, порог различимости при контроле среднего почти в 6 раз меньше, чем при контроле единичного значения за счет уменьшения дисперсии в n раз. Однако здесь нужно учитывать, что во втором случае величина δ относится к максимально возможному значению среднего, а в первом — к максимально возможному значению результата единичного измерения. Для того чтобы сопоставить данные пороги различимости, учтем, что максимально возможное отклонение случайной величины от среднего определяется критерием наибольшего норми-

рованного отклонения $Q_\alpha = \frac{C_i - \bar{C}}{\sigma}$, что при

$\alpha = 0.1$ и $n = 30$, $Q_\alpha(31) = 2.8$ [4] составит $C_{\max} = C + 2.8 \sigma$.

Без учета порога различимости нулевой и альтернативной гипотез эта величина равна $6 + 2.8 \times \times 3.45 = 15.66$, с учетом этого порога может с вероятностью $\beta = 0.05$ достигать $6 + 2.8\sigma + \delta = 17.6$, что почти в 3 раза больше допуска. При контроле единичного значения с $\alpha = \beta = 0.05$ такое превышение составит практически ту же величину: $6 + 11.3 = 17.3$, т. е. в данном случае осредненные результаты единичных испытаний и результаты контроля среднего практически совпадают.

Примечание 3 к примеру 2

Необходимо принимать во внимание, что происходит проверка двух статистических гипотез: о соответствии ПДК (уровень значимости α_0) и об отсутствии выброса (уровень значимости α_1). Поэтому общий уровень значимости определяется как $1 - \alpha_{\text{общ}} = (1 - \alpha_0)(1 - \alpha_1)$. В рассматриваемом случае это $1 - \alpha_{\text{общ}} = (1 - 0.05)(1 - 0.1) = 0.95 \times 0.9$, откуда $\alpha_{\text{общ}} = 0.15$ (ошибка 2-го рода при использовании критерия наибольшего нормированного отклонения не определяется).

Допусковый контроль (оценка экономической эффективности трансграничного сотрудничества)

Такой контроль необходим для принятия решений, позволяющих ограничивать эко-

го-экономический ущерб, потери и убытки вследствие ухудшения потребительских свойств природной воды и нарушения рекреационной ценности акваторий; он также упрощает планирование затрат на ликвидацию последствий загрязнения [20, 22]. Однако все это возможно, если существуют и выполняются договорные взаимоотношения между бассейновыми водными управлениями в каждой стране или между странами об обмене информацией о составе и свойствах воды на створах, контролирующих состав воды по обе стороны границы. Это позволяет водопользователям оперативно принимать меры, необходимые для защиты от загрязнения, поступающего с вышерасположенных створов.

Допусковый контроль осуществляется по алгоритмам, изложенным в [2] или в стандарте [6]. Однако для организации конструктивных водных отношений необходим учет некоторых особенностей, рассмотренных ниже.

На пунктах (створах) наблюдения возможны следующие альтернативные решения: вода соответствует установленным требованиям (далее индекс “С”) или не соответствует (“Н”). На створе 2 с учетом времени руслового добега с сохранением состава воды возможны следующие решения по результатам, полученным от створа 1: соответствие подтверждается (“СС”), несоответствие подтверждается (“НН”), несоответствие не подтверждается (“НС”), соответствие не подтверждается (“СН”) с вероятностями: $p_{\text{СС}}, p_{\text{НН}}, p_{\text{НС}}, p_{\text{СН}}$. Тогда экономические потери, связанные с ошибками водно-экологического контроля на створе 2, есть $L_{1S} = L_1 p_{\text{СН}} + L_2 p_{\text{НС}}$ из-за ложноотрицательных и ложноположительных заключений. Здесь L_1 — потери из-за ошибочного признания воды несоответствующей установленным требованиям, L_2 — то же из-за ошибочного соответствия.

При отсутствии контроля на створе 2 вся поступающая сверху вода может быть признана соответствующей, кроме “забракованной” на створе 1. Тогда относительные потери пропорциональны вероятности появления воды, действительно или ошибочно признанной несоответствующей установленным требованиям

лабораторией вышерасположенного створа: $L_{2S} = L_2 p_{\text{НН}} + L_2 p_{\text{НС}}$.

Это позволяет установить эффективность контроля в следующем виде:

$$E = \frac{L_{2S}}{L_{1S}} = \frac{L_2(p_{\text{НН}} + p_{\text{НС}})}{L_1 p_{\text{СН}} + L_2 p_{\text{НС}}} \quad (10)$$

Очевидно, что получаемая при контроле и конструктивных взаимоотношениях сторон информация о качестве воды полезна при условии, что $L_{1S} < L_{2S}$, так что чем выше E , тем полезнее межбассейновый (межстрановой) обмен информацией.

ПРИМЕР 3

Оценить эффективность оценки концентрации хрома общего в воде при ее трансграничном переносе в р. Илек между створами п. Целинный и п. Веселый Первый при $L_1 = L_2$, т. е. $E = \frac{p_{\text{НН}} + p_{\text{НС}}}{p_{\text{СН}} + p_{\text{НС}}}$. Сравнить результаты при отсутствии и наличии межстранового обмена информацией (в последнем случае, скорее всего, $E > 1$, так как $p_{\text{СН}} > p_{\text{НН}}$, потому что на вышерасположенном речном створе меньше всего заинтересованы допустить, чтобы соответствующее нормативу качество воды “ниже” было признано как несоответствующее).

Результаты контроля при принятых приближениях могут быть следующими:

1. При неудовлетворительном обмене информацией о качестве воды на створах заведомо $p_{\text{НН}} > p_{\text{СН}}$, и тогда $E < 1$.

2. При наличии обмена информацией ситуация изменяется. На вышерасположенном створе часто фиксируется повышенная концентрация хрома общего в воде, возможно, потому что выше п. Целинного на р. Илек расположен феррохромовый завод. Результаты измерений concentra-

ции хрома в воде в п. Целинном в 2021–2022 гг. приведены в табл. 4, из которой видно, что из общего числа измерений (12) доля соответствующих и несоответствующих нормативу – 6, поскольку принято, что ПДК = 0.06 мг/дм³ (пример 2).

На российской стороне (створ Веселый Первый) предоставленные результаты о сверхнормативном загрязнении воды были подтверждены, так что $p_{\text{НН}} = 6/12 = 0.5$. Кроме того, в двух случаях из 12 соответствие воды по хромов не было признано, поэтому $p_{\text{СН}} = 2/12 \sim 0.167$, и оказалось, что $p_{\text{НС}} = 0$. Отсюда $E = \frac{p_{\text{НН}} + p_{\text{НС}}}{p_{\text{СН}} + p_{\text{НС}}} \sim 4$, т. е.

значительно превышает эту величину при отсутствии обмена информацией.

Примечание 1 к примеру 3

Полученный результат может быть полезен для промышленных предприятий, где понимают, что предоставленные “сверху” результаты о сверхнормативном загрязнении обычно подтверждаются, и могут заранее подключить дополнительные узлы водоочистки. Учитывая, что скорость речного потока ~ 1 м/с и створы удалены друг от друга на 82 км, получаем, что для такой подготовки необходимо > 1 сут.

С другой стороны, систематический межгосударственный обмен информацией позволил бы органам управления согласовать необходимые мероприятия по восстановлению и охране водных объектов, а лабораториям двух стран выполнить сличительные испытания и выяснить причины возможных несоответствий, в частности – вышеприведенной ошибки 2-го рода ($p_{\text{СН}} = 0.167$).

Примечание 2 к примеру 3

В настоящее время при трансграничном переносе воды оценка уровней ложноположитель-

Таблица 4. Концентрация хрома (мг/дм³) в воде р. Илек, п. Целинный в 2020–2021 гг.

Дата измерения					
31.08.2021	29.11.2021	24.02.2021	29.03.2021	05.04.2021	12.04.2021
0.042	0.081	0.078	0.09	0.05	0.045
11.05.2022	27.06.2022	29.07.2022	27.08.2022	29.09.2022	30.11.2022
0.037	0.083	0.061	0.042	0.044	0.070

ных и ложноотрицательных заключений, как правило, не проводится. Соответственно, не оцениваются и потери из-за ошибочного признания контролируемых показателей качества соответствующими/несоответствующими установленным требованиям. Использование метода допускового контроля — задача будущих конструктивных межбассейновых (трансграничных) взаимоотношений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состав и свойства воды — случайные величины, поэтому решения об ее качестве не могут быть гарантированно точными и, в зависимости от характера имеющейся информации, должны опираться на выборочный или допусковой контроль. Предложенные в работе алгоритмы методов оценки показателей на вышерасположенном речном створе позволяют с учетом времени “добегания” воды предоставлять корректную информацию на нижерасположенный створ для формирования экономически и экологически сбалансированного водопользования. При этом, однако, передаваемые сведения включают в себя порог различимости статистических гипотез. Показано, что снижение этого порога сопровождается увеличением ошибок 1-го и 2-го рода, характеризующих риски участников водных отношений. Ограничение указанных рисков допустимым уровнем значимости возможно путем повышения количества выборочных измерений.

Показано также, что участникам водных отношений на соседних створах целесообразно согласовывать между собой способ ограничения контролируемых показателей, который может быть “строгим” или “нестрогим”. От этого зависит уровень риска ложноотрицательных или ложноположительных решений. На практике вывод о качестве воды в зависимости от выбранного способа ограничения особенно важен, если дисперсия концентрации контролируемых показателей соизмерима со средними значениями или даже больше.

Учет водно-экологических рисков — часть водохозяйственного управления, поэтому достоверный контроль качества воды с целью обе-

спечения устойчивого экономического развития регионов выходит на первое место в мире. Невозможно, в частности, обходиться без межбассейнового эколого-экономического сотрудничества, особенно важного при трансграничном переносе воды. Показано, что допусковой контроль позволяет обеспечить такое сотрудничество, однако это требует оценки экономических потерь при ошибочном определении показателей качества воды, возможно — с привлечением методики [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов О.А., Баданин Д.Н., Жук Е.И. и др. Основы информационной безопасности. М.: Изд-во МГТУ, 2008. 161 с.
2. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Иосифов П.А., Кириллин А.В. Математические основы риск-менеджмента технических систем. Т. 1. Экспертные методы оценки в риск-менеджменте АИР. М., 2016. 214 с.
3. Арбитражный процессуальный кодекс Российской Федерации от 24.07.2002. № 95-ФЗ (ред. от 06.04.2024).
4. Большой Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 254 с.
5. ГОСТ 27384-2002 Вода. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств.
6. ГОСТ Р 8.731-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Системы допускового контроля. Основные положения.
7. ГОСТ 34100.3-2017. Неопределенность измерений. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT).
8. Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы — стратегический фактор долгосрочного развития экономики России // Вестн. РАН, 2009. Т. 79. № 9. С. 789–796.
9. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: НТЦ “Промышленная безопасность”, 2006. 78 с.
10. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 213 с.
11. Лепихин А.П., Синцова Т.Н. К статистике показателей качества отводимых сточных вод // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление, 2023. № 2. С. 23–46. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_2

12. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 года). Утверждена приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 года № 1118.
13. Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 444 с.
14. Приказ Минприроды России от 13.06. 2009 г. № 87 “Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства” (с изменениями и дополнениями).
15. РД 52.24.522-2009. Массовая концентрация хрома общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с дифенилкарбазидом.
16. РМГ 63-2003 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации
17. Розенталь О.М., Авербух А.И. Введение в квалиметрию воды // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 4. С. 418–432.
18. Синцова Т.Н., Лепухин А.П. Совершенствование системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом стохастического характера их динамики // Сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием “Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг”. Ростов-на-Дону. Т. 1. Новочеркасск: “Лик”, 2023. С. 306–311.
19. Федеральный закон “Об обеспечении единства измерений” от 26.06.2008. № 102-ФЗ.
20. Hong Yao, Zhen You, Bo Liu. Economic Estimation of the Losses Caused by Surface Water Pollution Accidents in China From the Perspective of Water Bodies’ Functions // Int. J. Environ. Res. Public Health, 2016. V. 13. № 2. P. 1–13. DOI:10.3390/ijerph13020154
21. Lepikhin A.P., Voznyak A.A., Sintsova T.N. Statistical aspects in assessment of chemical loads upon water bodies // Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. Int. Sci. Practical Conf. London, 2022. С. 012129.
22. Yao H., Qian X., Yin H., Gao H., Wang Y. Regional risk assessment for point source pollution based on a water quality model of the Taipu River, China // Risk Anal. 2015. V. 35. № 2. P. 265–277. DOI: 10.1111/risa.12259

MODEL FOR ASSESSING CONTROL AND MANAGEMENT OF WATER QUALITY IN TRANSBOUNDARY WATER BODIES

O. M. Rosenthal^a, V. O. Polyanin^a, T. N. Sintsova^{b,*}

^aWater Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

^bMining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, 614007 Russia

*e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

Transboundary transport of pollution by riverbed water flows creates environmental and economic losses in areas located downstream of rivers. At the same time, very serious problems arise not only on watercourses crossing state borders, but also on the borders between individual entities of the same country. First of all, the problem of reliability of water quality assessment arises, in conditions of significant instability of the hydrological regime, based on existing monitoring systems. This problem is considered using the example of a transboundary river. Ural. An algorithm for forming a constructive dialogue between interested parties is proposed by taking into account the statistical characteristics of the measurement results obtained at neighboring hydrochemical observation sites. The expediency of taking into account for this purpose the threshold of distinguishability of controlled indicators, assessment and regulation of errors of the 1st and 2nd types is shown. The possibility of establishing economic losses due to the lack of constructive relations between the parties in terms of assessing controlled indicators has been demonstrated.

Keywords: water quality, transboundary water bodies, pollutants, Ural river.

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ЭКОЛОГО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕРЕСТИЛИЩ ОСЕТРОВЫХ В СРЕДНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ УРАЛ¹

© 2024 г. А. А. Чибилёв, Ж. Т. Сивохип*, Ю. А. Падалко, В. М. Павлейчик

Институт степи УрО РАН, Оренбург, 460000 Россия

**e-mail: sivohip@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2024 г.

После доработки 06.04.2024 г.

Принята к публикации 06.04.2024 г.

Выполнен анализ многолетних изменений эколого-гидрологических параметров обеспечения естественного воспроизводства осетровых. Установлено, что многолетние изменения гидрологических параметров происходят на фоне циклического характера развития фаз различной водности и трансформации внутригодового перераспределения стока. Рассмотрен вклад многолетнего регулирования стока Ириклинским водохранилищем в изменение водного режима р. Урал в пределах среднего течения. Сделан вывод о необходимости восстановления стада осетровых Северного Каспия. В качестве рекомендаций определены первоочередные меры, направленные на сохранение потенциала нерестилищ осетровых среднего течения р. Урал.

Ключевые слова: нерестилища, осетровые, гидрологические параметры, регулирование стока, уровень воды, русловые деформации.

DOI: 10.31857/S0321059624050134 EDN: VWTZGP

ВВЕДЕНИЕ

История исследования ихтиофауны р. Урал тесно связана с изучением волжского бассейна и всего бассейна Каспийского моря. Большинство видов рыб, обитающих в р. Урал, описаны по экземплярам, выловленным в реках Средней России. Первые описания рыб, обитающих в р. Урал, относятся к концу XVIII – началу XIX вв. [3]. В это время упоминается о 17 видах рыб, в основном тех же, что и в Волге, исключая сельдь, но включается новый вид – шип. В XX в. можно выделить крупные исследования по биологии осетровых и частиковых рыб, по анализу и регулированию промысла в работах В.Б. Петрова (1926–1928 гг.), М.И. Тихого [16], Г.Х. Шапошниковой [24]. С 1964 г. со времени создания Центрального научно-исследовательского института осетрового рыбного хозяйства (ЦНИОРХ) на Урале проводятся систематические исследования биологии рыб, но в основном в нижнем течении р. Урал [13, 25].

В 1981–1983 гг. по заданию Главрыбвода СССР лабораторией мелиорации ландшафтов Оренбургского сельскохозяйственного института была выполнена комплексная работа по паспортизации нерестилищ осетровых рыб на участке среднего течения р. Урал от устья р. Илек до г. Уральска (287 км) [21]. Это был единственный эпизод во всей истории ихтиологических исследований на среднем плесе реки, когда одновременно проводились оценка эффективности нереста, гидрологические наблюдения, топографическая съемка и бонитировка нерестовых участков. Исследования проводились в период максимальных показателей суммарного вылова осетровых видов рыб в XX в. [1, 22]. Несмотря на многолетнее регулирование стока Ириклинским водохранилищем, среднее течение р. Урал характеризовалось высокими уровнями весеннего половодья с затоплением низкой и средней поймы. При этом 1981 г. характеризовался расходами воды в период весеннего половодья, превышающими среднемноголетние. Эти обстоятельства позволяют принять полученные результаты в качестве контрольных для сравнительной эколого-гидрологической оценки изменений условий нереста

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания (тема “Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем”, AAAA-A21-121011190016-1).

осетровых за 40-летний период, что является целью настоящей работы.

Одно из основных условий, обеспечивающих благоприятный нерест осетровых рыб — наличие необходимого нерестового субстрата. В среднем течении р. Урал в качестве нерестового субстрата выступают отложения гравия, гальки, цементированного ракушечника, щебень меловых пород, глыбы и плиты песчаников. Состав аллювиальных отложений и особенности их формирования во многом определяются динамикой русловых процессов. В проведенном исследовании рассмотрены вопросы многолетней неоднородности речного стока р. Урал и внутригодовых трансформаций, выявлены изменения состояния и качества нерестилищ, оценена степень благоприятности нереста с учетом температурных и уровневых показателей.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве ключевого принят участок р. Урал от с. Илек до г. Уральска, относящийся преимущественно к типу свободно меандрирующих русел. Коренные борта речной долины (в том числе и на участках, подмываемых рекой) сложены рыхлыми отложениями. Исключение составляют локальные поднятия на левобережье реки, генетически связанные с соляной тектоникой и сложенные меловыми, реже пермскими, триасовыми и палеогеновыми породами, служащие основой для формирования щебнистых перекастов. Ширина поймы достигает 15 км, за исторический период здесь наблюдались существенные трансформации на уровне макроизлучин и отдельных меандр [12].

Исходя из морфологических особенностей строения поймы и характера русловых процессов выделяется четыре географических участка долины (рис. 1): I. Уральско-Рубежинский (0–94 км, протяженность по руслу 94 км); II. Рубежинско-Кирсановский (94–179 км, 85 км); III. Кирсановско-Кинделинский (179–223 км, 45 км); IV. Кинделинско-Илекский (223–315 км, 92 км).

В пределах участка I реки находятся две зоны интенсивного развития гравийно-галечных

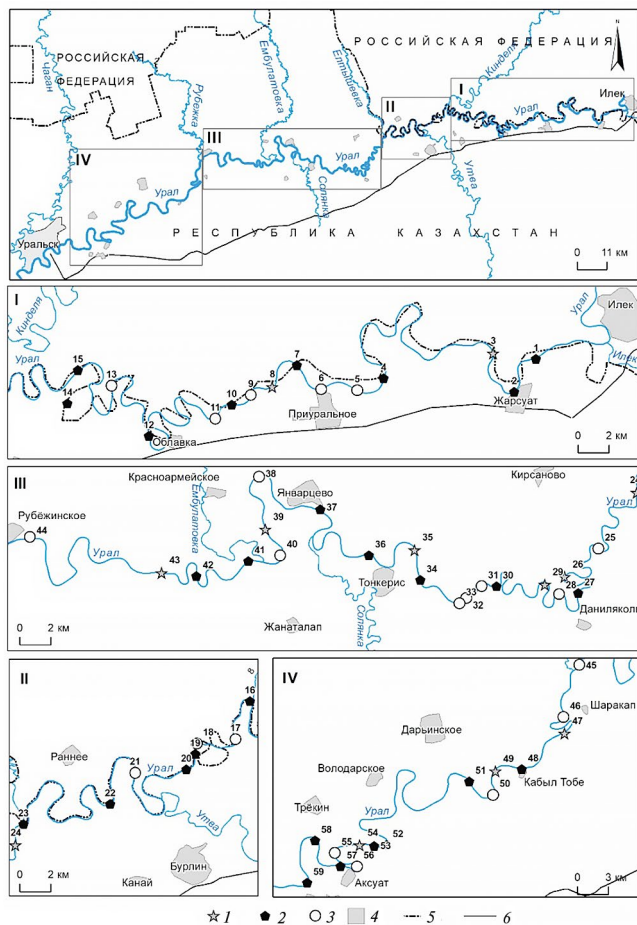


Рис. 1. Картограмма района исследования участка среднего течения р. Урал от с. Илек до г. Уральска. Категории нерестилищ: 1 — высшая, 2 — первая, 3 — вторая; 4 — населенные пункты; 5 — Государственная граница; 6 — автомобильная дорога Оренбург-Уральск. Участки: I. Илекско-Кинделинский; II. Кинделинско-Кирсановский; III. Кирсановско-Рубежинский; IV. Рубежинско-Уральский. Числами на карте обозначены нерестилища: 1. Нижнеилекское. 2. Жарсуатское. 3. Нижнежарсуатское. 4. Теренсайское. 5. Мельниковское. 6. Приуральное. 7. Нижнеприуральное. 8. Верхнекушкарское. 9. Среднекушкарское. 10. Нижнекушкарское. 11. Верхнедунанское. 12. Облавское. 13. Буренинское. 14. Жеребшанское. 15. Бородинское. 16. Усть-Кинделинское. 17. Старицкое. 18. Целиковское. 19. Среднеиртекское русловое. 20. Нижнебелогорское. 21. Усть-Иртекское. 22. Ранневское. 23. Нижнебатраковское. 24. Верхнекирсановское. 25. Нижнесудачное. 26. Сагитовское. 27. Новоутвинское. 28. Данилякульское. 29. Жереховское. 30. Цепное. 31. Усть-Кирсановское. 32. Елтышевское. 33. Верхнеалебастровское. 34. Алебастровское. 35. Нижнеалебастровское. 36. Долинское. 37. Январцевское. 38. Комбавское. 39. Перекрешенское. 40. Сигний рынок. 41. Бурянинское. 42. Дубяковское. 43. Аксайское. 44. Верхнерубежинское. 45. Рубежинское. 46. Мордовье. 47. Сауркино. 48. Красношольное. 49. Окунишниково. 50. Кумысное. 51. Верхнешумихинское. 52. Сазанье. 53. Карабекское. 54. Среднетравное. 55. Куриное. 56. Аксуатское. 57. Верхнезолотое. 58. Верхнетрекинское. 59. Верхнежелезнодорожное.

и крупнообломочных обнажений. На участке II наибольший интерес представляют плесы с гравийно-галечными перекатами, занимающие до 50% русла. Участок III отличается тем, что здесь впадают в Урал три крупнейших притока: Кинделя, Иртек, Утва, с устьями которых связаны комплексы нерестилищ. Их функционирование и мелиоративное состояние зависят от режима этих притоков [21]. Участок IV уникален тем, что к левому берегу вплотную подходят солянокупольные структуры, формирующие глубоководные плёсы у обрывистых берегов, острова, пляжи и перебаты, сложенные грубообломочными материалами [23].

В р. Урал обитают 5 видов генеративно пресноводных видов осетровых видов рыб: белуга (*Huso huso*), русский осетр (*Acipenser guldenstaedtii*), персидский осетр (*Acipenser persicus*), шип (*Acipenser nudiventris*), севрюга (*Acipenser stellatus*) и один типично пресноводный вид — стерлядь (*Acipenser ruthenus*). В настоящее время основные промысловые виды рыб р. Урал следующие: лещ, судак, язь, жерех, сом, сазан, подуст. В пойменных озерах преобладают карась, окунь, щука, плотва, голавль, язь. В зимний период основу промысла составляют малоценные и хищные виды рыб, в весенний период — ценные: лещ, судак, сом. Основные рыбные ресурсы сконцентрированы в р. Урал и его крупных притоках, реках Илек и Сакмаре, которые лишь частично освоены промыслом [4, 8, 9, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка динамики русловых деформаций проведена сопоставлением спутниковых снимков среднего разрешения за 1980 и 2022 гг. (Landsat 1-5 MSS, 8-9 OLI/TIRS) в летне-осенний межженный период. Использованы методы анализа спутниковых снимков и геоинформационный инструментарий программ ENVI 5.3. и ArcGIS 10.8.

В 2023 г. проведено полевое обследование 51 из 59 нерестилищ осетровых рыб, выявленных в 1980–1982 гг., в ходе которого проведена комплексная оценка состояния подводной и наземной поверхностей нерестилищ и верификация данных, полученных на камеральном

этапе исследования. Оценивались последствия горизонтальных русловых деформаций р. Урал, зарастания, заиления и скопление каршей, качество грунта, наличие преобразований рельефа на затопляемых участках нерестилищ. Отмечены факторы антропогенного воздействия — доступность (наличие подъезда или подхода), водозаборы, добыча песчано-гравийной смеси (ПГС), водопой сельскохозяйственных животных. На ключевых участках с помощью измерительных приборов проводились промеры глубин для определения морфологических параметров переколов и зимовальных ям.

Анализ многолетних изменений уровня режима для оценки оптимальных эколого-гидрологических условий функционирования нерестилищ для Нижнеилекского участка выполнен на основе многолетних данных наблюдений (1940–2020 гг.) на гидропосту в с. Илек. Для анализа выбраны годы, характеризующиеся разной водностью и режимом (условно-естественный и зарегулированный).

В исследовании принята трехступенчатая шкала бонитировки нерестовых площадей исходя из площади нерестилищ, гранулометрического состава слагающих грунтов и степени их связанности, устойчивости во времени и пространстве, скорости течения, заиленности, степени зарастаемости и засоренности их поверхностей.

1. Нерестилища высшей категории — достаточно крупные (>10 га) русловые и затопляемые участки, сложенные крупнообломочными материалами — щебнем, галькой, ракушечником, действующие при любых половодьях длительное время. На нерестилищах высшей категории хорошая промыываемость грунта из-за высоких скоростей течения, отсутствует заиление.

2. Нерестилища I категории — крупные (≥ 5 га) участки реки с преобладающими крупнообломочными грунтами и достаточно быстрым течением в паводок и межень (≥ 0.6 м/с). Процессы заиления на этих нерестилищах развиты очень слабо.

3. К нерестилищам II категории отнесены русловые и затопляемые участки, сложенные

песчано-гравийными отложениями или чистыми крупнозернистыми песками, а также русловые площади с плотными глинами. К этому же бонитету относятся частично заросшие, заиленные (до 25% площади) участки, сложенные крупнообломочными материалами, и комплексы крупнообломочных и песчаных отложений, в которых они вместе с гравийными полями занимают $\geq 50\%$ площади.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрологические параметры обеспечения функционирования нерестилищ

Эффективность естественного воспроизводства осетровых в бассейне р. Урал определяется сложным взаимодействием ряда факторов — высоким уровнем половодья, температурным режимом, наличием нерестового субстрата, высокими скоростями течения в половодье (0.8–2.0 м/с) и др. [18, 20–22].

Один из лимитирующих факторов естественного воспроизводства ценных видов рыб — значительная амплитуда сезонных колебаний речного стока в исследуемом бассейне. Водный режим большинства водотоков (кроме р. Сакмары и верховий р. Урал) относится к казахстанскому типу с преобладанием снегового питания (прежде всего в период максимального стока), доля которого повышается от верховий к приустьевой части. Для рек равнинно-степной части бассейна р. Урал зимние осадки — основной элемент приходной части водного баланса, во многом определяющий объемы весеннего половодья и характер стока в течение всего года.

Согласно результатам многочисленных исследований, современная тенденция изменения водного режима рек Европейской территории России (ЕТР) — сокращение доли стока весеннего половодья и увеличение доли меженного стока [2, 5–7, 10, 15, 17].

Увеличение расходов меженного стока (зимнего сезона) имеет важное эколого-гидрологическое значение для озимых рас осетровых, так как облегчает их подъем и зимовку, а во время хода озимых осетровых облегчает их преднерес-

товую миграцию и улучшает условия обитания в зимовальных ямах. Вместе с тем для создания благоприятных условий нереста основной фактор — оптимальный режим половодного периода. В целом, даты наступления максимальных расходов на реках исследуемого бассейна зависят от природно-зонального положения и расчлененности рельефа на водосборах, запасов снега и непосредственно от погодных условий, установившихся в период активного снеготаяния. Таким образом, реки бассейна вносят разновременный и существенно различный вклад в формирование волны половодья на разных участках главной реки.

Современные тенденции в трансформации внутригодового стока — смещение дат наступления максимумов весеннего половодья на более поздние сроки (рис. 2). Смещение наступления максимальных расходов воды играет негативную роль в установлении оптимального температурного режима для эффективного функционирования нерестилищ.

Значительное влияние на динамику максимальных расходов весеннего периода в среднем течении р. Урал оказывает многолетнее регулирование стока Ириклинским водохранилищем [10]. Срезка пика весеннего половодья изменила сроки функционирования затопляемых нерестилищ; на спаде половодья снижаются скорости течения воды, и нерест в конце мая происходит в менее благоприятных условиях. Вместе с тем отметим, что антропогенное сокращение весеннего стока особенно ощутимо в маловодные годы ($P - 90-95\%$). Также следует учесть, что сток р. Урал ниже плотины Ириклинского водохранилища пополняется за счет притоков с равнинно-степной территории, занимающей 45660 км², или 55% от площади водосбора гидропоста Оренбург (82300 км²). Примерно треть этого объема (0.54 млн м³) формирует сток рек Ори и Большой Кумак. В итоге, к створу Оренбург (590 км ниже по течению) объем стока р. Урал удваивается (3.21 млн км³) по сравнению с объемом воды, поступающим в Ириклинское водохранилище (1.65 млн км³) [11].

Ниже г. Оренбурга существенную роль в формировании объемов весеннего половодно-

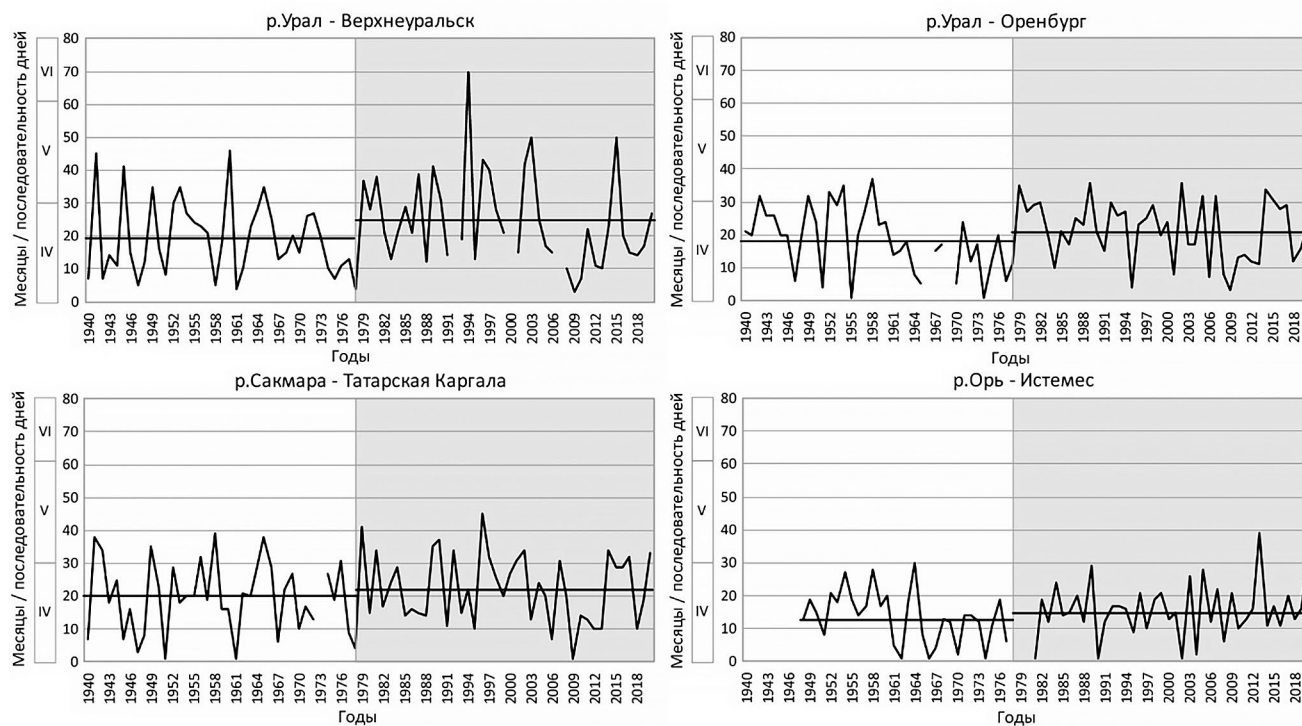


Рис. 2. Многолетняя динамика наступления дат максимальных расходов весеннего половодья в бассейне р. Урал. Средние значения дат за периоды (ось Y – месяцы и последовательность дней, начиная с 1 апреля).

го стока и, соответственно, в формировании благоприятных условий для нереста осетровых играет главный приток – р. Сакмара. Реки бассейна р. Сакмары по характеристикам водного режима относятся к восточно-европейскому типу – высокое половодье, летне-осенняя межень зачастую с повышенным стоком за счет дождевых паводков. Водосборная территория р. Сакмары охватывает горнолесные предгорья Южного Урала (кроме р. Салмыш), которые формируют до 60% поверхностного стока в створе в слиянии рек Урал и Сакмары. Кроме того, для большинства рек бассейна главного притока р. Урал не установлена современная тенденция внутригодового распределения стока – сокращения доли стока весеннего половодья в годовом объеме воды. Соответственно, р. Сакмара выполняет важную эколого-гидрологическую функцию, обеспечивая участок р. Урал ниже г. Оренбурга гарантированными объемами весеннего половодья.

Анализ многолетних изменений уровня режима для оценки оптимальных эколого-гидрологических условий функционирования не-

рестилищ выполнен на основе многолетних данных гидропоста в с. Илек. Годовой ход уровня воды р. Урал на данном участке характеризуется четко выраженной волной весеннего половодья, сравнительно низкой летне-осенней меженью и небольшим повышением уровня в течение осеннего и зимнего сезонов. Весеннее половодье на данном участке р. Урал проходит одной волной, на подъеме, гребне и, реже, спаде которой наблюдаются незначительные колебания уровней. Максимальный уровень весеннего половодья в пределах исследуемого участка наблюдается, как правило, во второй-третьей декаде апреля. Превышение максимальных весенних уровней над минимальными на р. Урал в с. Илек в среднем за период наблюдений меняется от 1 до 5 м. Распределение (повторяемость) уровней весеннего половодья представлено в табл. 1.

В целом, в годы средней водности (1943, 1983 гг.), независимо от особенностей гидрологического режима (условно-естественный или зарегулированный), частота (повторяемость) наивысших уровней составляет в среднем 50–60% (преимущественно в апреле), что обеспе-

Таблица 1. Распределение уровней воды весеннего половодья (апрель–май) на р. Урал (с. Илек)

Интервал уровня, см	Повторяемость (частота)		Интервал уровня, см	Повторяемость (частота)		Интервал уровня, см	Повторяемость (частота)	
	<i>n</i>	%		<i>n</i>	%		<i>n</i>	%
Апрель 1943 г.			Апрель 1983 г.			Апрель 2020 г.		
764–724	15	50.0	850–801	17	56.7	455–431	0	0
723–673	1	3.3	800–740	2	6.7	430–400	3	10.0
672–622	0	0	739–679	2	6.7	399–369	4	13.3
621–571	1	3.3	678–628	0	0	368–338	4	13.3
570–520	0	0	627–567	1	3.3	337–307	4	13.3
519–469	1	3.3	566–506	1	3.3	306–276	4	13.3
468–418	1	3.3	505–445	0	0	275–245	2	6.7
417–367	0	0	444–384	1	3.3	244–214	2	6.7
366–316	0	0	383–323	2	6.7	213–183	8	26.7
316–265	0	0	322–262	2	6.7			
264–214	4	13.3	261–212	2	6.7			
213–200	7	23.3						
Май 1943 г.			Май 1983 г.			Май 2020 г.		
764–724	5	16.7	850–801	7	22.6	455–431	8	25.8
723–673	1	3.3	800–740	3	9.7	430–400	3	9.7
672–622	2	6.7	739–679	1	3.2	399–369	2	6.5
621–571	2	6.7	678–628	2	6.5	368–338	3	9.7
570–520	2	6.7	627–567	3	9.7	337–307	4	12.9
519–469	1	3.3	566–506	4	12.9	306–276	6	19.4
468–418	2	6.7	505–445	7	22.6	275–245	6	19.4
417–367	10	33.3	444–384	4	12.9	244–214	0	0
366–316	6	20.0	383–323	0	0	213–183	0	0
316–265	0	0	322–262	0	0			
264–214	0	0	261–212	0	0			
213–200	0	0						

чивает формирование достаточно оптимальных эколого-гидрологических условий, в том числе и для эффективного функционирования нерестилищ. В маловодные годы (2020 г.) распределение уровней весеннего половодья более равномерно, что обусловлено невысокой скоростью его подъема. Так, частота (повторяемость) наивысших уровней (430–455 м) в мае 2020 г. $\geq 26\%$; максимальная повторяемость была характерна для средних уровней (245–306 см).

Ключевой фактор формирования благоприятных эколого-гидрологических условий для нереста осетровых – продолжительность стояния высоких уровней весеннего половодья. Данный параметр важен, в частности, для формирования оптимального температурного режима, необходимого для эффективного естественного воспроизводства осетровых. В целом, максимальные

уровни на р. Урал (с. Илек) обычно удерживаются до 3–5 дней, относительно высокие – 20–25 дней. Например, в 1983 г. продолжительность стояния высоких уровней (800–850 см) составила 25 сут (с 14 апреля по 8 мая), что, несомненно, повлияло на параметры обводненности нерестовых участков. В маловодный 2020 г. наиболее продолжительный (10 сут) период соответствовал низким уровням весеннего половодья – 276–306 см.

От сочетания таких параметров, как повторяемость (частота) и продолжительность стояния высоких уровней, зависят формирование волны половодья, ее конфигурация и площадь затопления нерестилищ осетровых рыб (рис. 3).

В средневодные и многоводные годы наблюдается особенно заметное распластывание

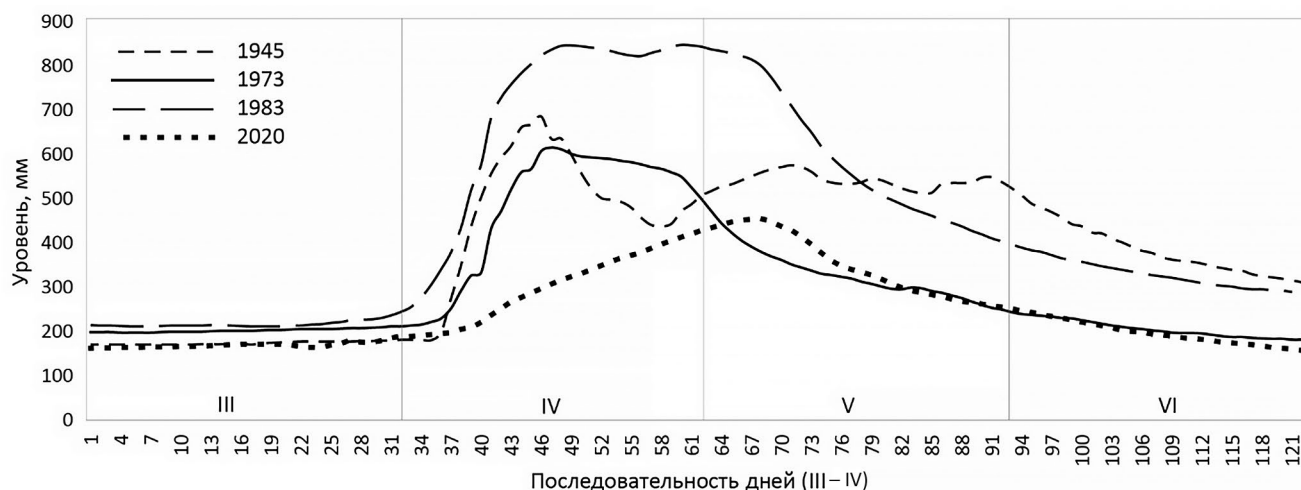


Рис. 3. Ход волны весеннего половодья на р. Урал (с. Илек) в разные по водности годы.

волны половодья, в связи с чем происходит увеличение продолжительности половодья по всей длине нерестовых участков. Продолжительность половодья в среднем составляет 2.0–2.5 мес. в зависимости от водности года. Заканчивается половодье, как правило, ко второй декаде июня в годы средней и высокой водности; в маловодные годы фаза летней межени сменяет фазу весеннего половодья уже к началу июня.

Как отмечено выше, от пространственно-временных особенностей формирования и прохождения волны весеннего половодья зависит установление оптимального термического режима в пределах нерестовых участков. Наиболее благоприятный диапазон температуры для эффективного естественного воспроизводства осетровых рыб — 10–22°C, но для отдельных видов, особенно для ранней молоди, температурные оптимумы различны (табл. 2).

По среднегодовым параметрам температурного режима в среднем течении р. Урал — достаточно оптимальные термические условия для естественного воспроизводства осетровых, в первую очередь озимых рас. Как правило, прогревание воды начинается во второй-третьей декадах апреля, максимальная температура (20–23°C) достигается в первой половине июля, в отдельные годы нарастание температуры отмечается и в первой половине августа.

Ниже (табл. 3) приведены обобщенные показатели температурного режима р. Урал в среднем течении за два периода — 1980–1985 и 2015–2020 гг. В целом, период 1980–1985 гг. характеризовался благоприятными термическими условиями для функционирования нерестилищ — среднедекадные значения температуры воды соответствовали оптимумам, необходимым для начала весеннего хода и нереста осетровых озимых рас.

Таблица 2. Температурные оптимумы (°C) естественного воспроизводства осетровых в бассейне р. Урал [22]

Вид осетровых	Температурный режим			
	весенний ход		осенний ход	
	пик хода	нерест	пик хода	нерест
Белуга	+4...+7	+9...+15	+11...+17	+11...+17
Русский осетр	—	+14...+18	—	+8...+12
Персидский осетр	—	+16...+22	—	—
Шип	+12...+13	+13...+18	—	—
Севрюга	+8...+10	+12...+26	—	—

Таблица 3. Динамика температуры (°C) воды в р. Урал (г. Уральск) в нерестовый период (апрель–июнь)

Период, годы	IV			V			VI		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1980–1985	0.1	3.6	8.8	12.5	14.9	17.0	18.0	19.5	21.3
2015–2020	2.1	6.2	9.9	13.9	16.5	18.4	20.1	21.6	24.1

Таблица 4. Площадь затопляемой и русловой частей нерестилищ по географическим районам

Участок	Русловая часть		Весенне-затопляемая часть	
	га	%	га	%
I. Илекско-Кинделинский	212.9	72.8	79.2	27.2
II. Кинделинско-Кирсановский	166.1	64.1	92.9	35.9
III. Кирсановско-Рубежинский	62.3	81.2	14.4	18.8
IV. Рубежинско-Уральский	123.4	74.8	41.5	25.2
Всего	564.7	71.2	228.0	28.8

Среднедекадные значения температуры воды современного периода (2015–2020 гг.) также свидетельствуют о благоприятном температурном режиме, что, несомненно, должно обеспечивать эффективность функционирования нерестовых участков в пределах среднего течения р. Урал. Вместе с тем более интенсивное прогревание воды по сравнению с периодом 1980–1985 гг. обусловлено не только весенними метеорологическими условиями, но и преобладанием лет со сравнительно низкими уровнями воды весеннего половодья. Так, для современного периода средний уровень в апреле составляет 266.3 см, в мае – 335.8 см (в 1980–1985 гг. – 421.6 и 524.8 см соответственно), что, в свою очередь, негативно сказывается на параметрах обводненности в пределах нерестовых участков.

Эколого-географические изменения состояния нерестилищ осетровых рыб среднего течения р. Урал за 40-летний период (1981–2021 гг.)

Выделенные в среднем течении р. Урал нерестилища имеют общую протяженность ~60 км, что составляет <20% длины всего участка (на них приходится ~50% общей площади нерестилищ). Важные характеристики нерестовых участков – соотношение русловой и весенне-затопляемой частей нерестилищ, а также площадь затопления при различных уровнях половодья. Из 793 га нерестилищ русловая составляет 564.7 га, или 71.2%, весенне-затопляемая – 28.8%, 228 га (табл. 4).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что русловая часть всех участков составляет $\geq 2/3$ всей площади нерестилищ. Это обеспечивает функционирование нерестилищ на протяжении всего обследуемого плеса при самом низком половодье. Основные площади нерестилищ затопляются полностью уже при низких (до 75%) обеспеченностях половодья.

Установлено, что с 1981 по 2021 г. эколого-гидрологические изменения затронули большую часть (79%) нерестилищ во всех категориях. В результате естественных деформаций русла утрачено 2 нерестилища высшей и первой категории. Кроме того, 2 нерестилища первой и второй категории утрачены в результате антропогенных преобразований русла и природных процессов. Полное зарастание береговой части, заиление и изменение строения русла отмечено для 24% затопляемых нерестилищ. Половина (49%) нерестилищ имеет частичное зарастание древесной растительностью, заиление прибрежной части и средней части пляжей с навалами каршей. Только для 20% нерестилищ не отмечено визуальных признаков нарушенности. Выявлено десять потенциально затопляемых нерестилищ. Установлена хорошая сохранность протяженных русловых перекатных нерестилищ осетровых рыб (рис. 4).

Ниже приведена краткая характеристика участков.

Илекско-Кинделинский участок р. Урал (от с. Илек до устья р. Кинделя). С 1981 по 2021 г.

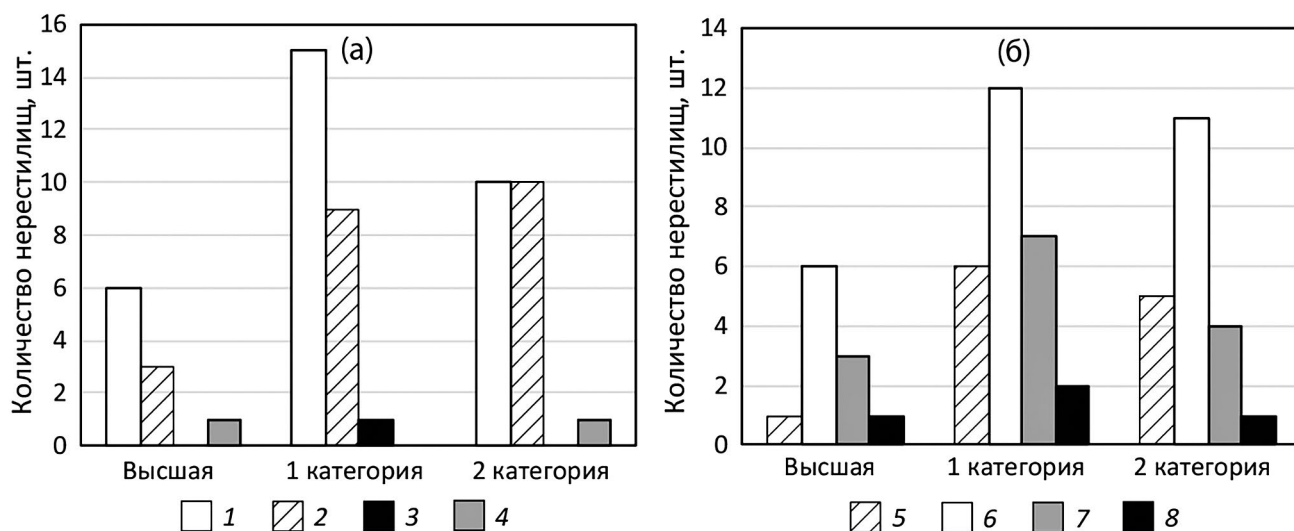


Рис. 4. Современное состояние осетровых нерестилищ. а – факторы антропогенного воздействия: 1 – доступное (имеется транспортный подъезд, подход для водопоя скота, рекреация, наличие рыбацких станов); 2 – не выявлено; 3 – добыча песчано-гравийной смеси; 4 – наличие водозабора. б – степень сохранности нерестилищ по сравнению с 1982 г.: 5 – ненарушенные; 6 – частичное зарастание, заиление, закаршованность; 7 – полное зарастание и/или изменение русла; 8 – утраченное.

среднее смещение русла составило 42.9 м. Изменения до 50 м наблюдались на 80% участка. Смещение русла реки на ≥ 100 м на <5% участка (максимальное – в излучинах возле с. Жарсуат, в 3 км выше по течению от с. Приурального и у с. Облавка). На Илекско-Кинделинском участке расположено 16 нерестилищ различного типа. В результате спрямления излучины в 5 км к СВ от с. Утвинка утрачено Жеребшанское нерестилище первой категории. Только 2 из 16 нерестилищ имеют ненарушенную затопляемую часть. К основным антропогенным факторам относятся наличие населенных пунктов в непосредственной близости от реки, водозаборы, места водопоя сельскохозяйственных животных, а также рыбацкие станы и места на берегу с транспортной доступностью. Строительство железобетонных берегоукрепительных сооружений проведено на левобережье в непосредственной близости от нерестилищ первой категории у сел Жарсуат и Облавка, а также отмечена добыча ПГС для строительства автодороги Илек–Уральск, осуществляемая земснарядами. При обследовании с помощью эхолота “Lowrance HDS 9” отмечено наличие обширных зимовальных ям глубиной до 5–6 м. В сравнении с батиметрической съемкой в начале 1980-х гг. отмечено уменьшение максимальных глубин на 1–3 м.

Кинделинско-Кирсановский участок р. Урал в настоящее время имеет протяженность 40.2 км от устья р. Киндели до истока Кирсановской протоки. В этот период закончено спрямление излучины между Целиковским и Старицким нерестилищами. Среднее смещение русла – 41.3 м. Изменения до 50 м произошли на 81% протяженности участка. Максимальное смещение (на ≥ 100 м) произошло в районе Целиковского нерестилища и у с. Раннего. На этом участке расположено 8 нерестилищ разного типа, половина из них – с ненарушенной затопляемой частью. Частичное зарастание и заиление береговой части установлено на четырех нерестилищах. Антропогенное влияние отмечено только на Нижнебатраковском нерестилище – транспортная доступность открытой части русла, рыбацкий стан на противоположном берегу, заброшенный карьер по добыче ПГС. В ходе экспедиционных работ участок обследован частично в связи с приграничным положением на территории Республики Казахстан.

Кирсановско-Рубежинский участок р. Урал протяженностью 92.8 км расположен полностью в Западно-Казахстанской области Республики Казахстан. С начала 1980-х гг. по 2021 г. протяженность участка увеличилась на 4.1 км. За данный период закончено спрямление излу-

чины в районе Сагитовского нерестилища высшей категории, в результате оно было утрачено. Среднее смещение русла составляет 68.4 м, изменения до 50 м приходятся только на 52% участка. На отрезки с максимальным смещением (на ≥ 125 м) приходится ~21%. В отличие от других участков на современном этапе, здесь наименьшая ширина пояса меандрирования и небольшой шаг излучин. Процессы русловой деформации проходят значительно динамичней, чем на других участках. Высокая скорость потока и русловые деформации способствуют как образованию новых нерестилищ, так и поддержанию устойчивости ранее образованных. Из 20 нерестилищ к ненарушенным можно отнести 6, они расположены по отрезкам с наименьшими показателями смещения русла. В то же время на данном участке сформировались несколько затопляемых нерестилищ, которые по визуальному обследованию можно отнести к категории 1. В ходе промера глубин на конце участка между с. Рубежинским ЗКО и устьем р. Рубежки была обнаружена зимовальная яма у правого берега глубиной от 4 до 8 м. Формирование на этом месте зимовальной ямы, возможно, связано с антропогенной деятельностью, так как на берегу имеются остатки строений, которые использовались для погрузки зерна на баржи, и в этом месте проводились дноуглубительные работы.

Рубежинско-Уральский участок р. Урал имеет протяженность 74.6 км. За исследуемый период произошло увеличение участка на 2.7 км, уклон снизился на 0.2% и составляет 6.7%. Среднее смещение русла составляет 55.2 м, изменили положение до 50 м 68% участка. На отрезки с максимальным смещением ≥ 125 м приходится ~22%. На данном участке от с. Рубежинского до г. Уральска периодически проводились дноуглубительные работы для целей судоходства. За 40 лет к настоящему времени утрачено 2 нерестилища из 15. Рубежинское нерестилище перестало существовать в результате прекращения функционирования левого рукава р. Урал. Верхнежелезнодорожное нерестилище уничтожено в результате добычи ПГС карьерным способом. Основной антропогенный фактор на участке — дноуглубительные работы, заезд транспорта, водопой скота.

ВЫВОДЫ

Многолетние изменения гидрологических характеристик р. Урал, обеспечивающих оптимальное функционирование нерестилищ, определяются чередованием фаз повышенной и пониженной водности, а также современными тенденциями внутригодового распределения стока. Выравнивание гидрографа годового стока неоднозначно влияет на потенциальную эффективность функционирования нерестовых участков. Длительное отсутствие промывного режима во время весеннего половодья приводит к ухудшению экологического состояния нерестилищ и зимовальных ям (заиливание и зарастание каменисто-галечного субстрата, нарушение кислородного режима и др.). Кроме этого, в результате формирования низкой волны половодья сокращается повторяемость (частота) и продолжительность стояния высоких уровней, что также негативно сказывается на площади затопления нерестовых участков. С другой стороны, повышение расходов воды зимней межени, которая совпадает с началом хода озимых рас осетровых, облегчает их преднерестовую миграцию и улучшает условия обитания в зимовальных ямах. Вклад регулирования стока Ириклинским водохранилищем в перераспределение сезонных элементов годового стока для рассматриваемого участка незначителен.

Главная причина отсутствия нерестовых миграций и нереста осетровых в среднем течении р. Урал в последние 20 лет — отсутствие производителей проходных форм осетровых, приходящих на нерест из Северного Каспия, и уничтожение туводных популяций русского осетра и шипа. Воспроизводство осетровых в среднем течении р. Урал полностью зависит от восстановления стада в Северном Каспии.

За последние 40 лет под влиянием эколого-гидрологических факторов произошли значительные изменения на участках нерестилищ. В результате деформаций русла утрачено два нерестилища высшей и первой категории, 2 нерестилища первой и второй категории в результате антропогенных преобразований русла. Полное зарастание береговой части, заиливание и изменение строения русла отмечено для 24% затопля-

емых нерестилищ, 49% нерестилищ осетровых имеют частичное зарастание древесной растительностью, заиление прибрежной части и средней части пляжей с навалами каршей. Примерно 25% нерестилищ сохранили свою площадь и качество, установленное в 1981–1983 гг. Выявлено десять потенциальных затопляемых нерестилищ, и установлена хорошая сохранность протяженных русловых перекатных нерестилищ осетровых рыб. Русловые нерестилища более стабильны во времени и находятся в удовлетворительном состоянии на всех участках среднего плеса р. Урал. Незатронутые и малоизмененные затопляемые части нерестилищ располагаются по отрезкам русла с небольшой русловой деформацией (до 1 м/год) на участках с малой доступностью. Наиболее перспективный участок формирования новых нерестилищ и сохранения прежних – Кирсановско-Рубежинский.

К первоочередным мерам, направленным на сохранение потенциала нерестилищ, следует отнести регламентацию работ по искусственному изменению рельефа русла (дноуглубительные работы, добыча ПГС) и создание системы особо охраняемых природных территорий, охватывающей наиболее ценные нерестилища осетровых и зимовальные ямы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмеденов К.М., Чибилев А.А. Современные экологические проблемы восстановления и сохранения популяции осетровых рыб в бассейне реки Урал // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. № 1. С. 6–16. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-1-6-16
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
3. Бородин Н.А. Статистическое описание Уральского казачьего войска. Уральск, 1891. С. 7.
4. Власенко А.Д., Ходоревская Р.П. Промысловые и статистические показатели численности осетровых в Каспийском бассейне // Рыб. хоз-во. 2004. № 3. С. 43–45.
5. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кашутин Е.А., Барабанова Е.А. Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 55–78.
6. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Вод. ресурсы. 2015. Т. 15. № 6. С. 581–588.
7. Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г. Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопр. географии. Гидрол. изменения. 2018. № 145. С. 285–297.
8. Картюк М.И., Мажник А.Ю., Кушнарченко А.И. Современное состояние и перспективы использования биоресурсов на 2006 год // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2004 год. Астрахань: КаспНИРХ, 2005. С. 212–223.
9. Ким Ю.А. Состояние популяции осетровых в реке Урал // Состояние запасов промысловых объектов на Каспии и их использование. Астрахань: КаспНИРХ, 2001. С. 94–99.
10. Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова А.Ж. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2018. № 1. С. 90–101.
11. Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ. Науч.-приклад. справочник / Под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: РПЦ Офорт, 2017. 132 с.
12. Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т., Падалко Ю.А. Динамика русловых процессов в среднем течении реки Урал и риски природопользования // Изв. РАН. Сер. географическая. 2018. № 5. С. 37–45. DOI: 10.1134/S2587556618050126
13. Песериди Н.Е. Кладовая рыбных богатств // Бассейн Урала: проблемы, перспективы. Оренбург, 1979. С. 42–49.
14. Романов А.А., Левин А.В., Журавлева О.Л., Ходоревская Р.П. и др. Распределение, качественная структура и численность осетровых рыб в Каспийском море и предварительный прогноз их прилова при промысле частиковых рыб на 2006 г. // Рыбохозяйственные исследования на Каспии. Результаты НИР за 2004 год. Астрахань: КаспНИРХ, 2005. С. 244–253.
15. Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Падалко Ю.А. Изменения минимального стока в бассейне реки Урал // Изв. РАН. Сер. географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 900–913.
16. Тихий М.И. Использование и экология рыб р. Урала в связи с регулированием реки. Большая Эмба. Т. II. М.; Л., 1938.

17. Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2010. № 6. С. 8–16.
18. Чибилев А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 312 с.
19. Чибилев А.А. Из истории развития и изучения промысла осетровых в реке Урал // Геоэкологические проблемы трансграничного бассейна р. Урал. Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург, 2008. С. 109–114.
20. Чибилев А.А. Редкие виды рыб Оренбургской области и их охрана: Материалы для Красной книги Оренбургской области. Екатеринбург: Наука, 1993. 32 с.
21. Чибилев А.А. Эколого-географические особенности нерестилищ осетровых и в среднем течении р. Урал // Первый Конгресс ихтиологов России: тезисы докладов. Астрахань: ВНИИРХиО, 1997. С. 94–95.
22. Чибилев А.А., Дебело П.В. Рыбы Урало-Каспийского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 227 с.
23. Чибилев А.А., Рамазанов С.К., Грудинин Д.А., Падалко Ю.А. О сохранении объектов природного наследия Бурлинско-Теректинского левобережья реки Урал в Западно-Казахстанской области // Вопр. степеведения. 2023. № 4. С. 4–13.
24. Шапошникова Г.Х. Биология и распределение рыб в реках Уральского типа. М.: Наука, 1964.
25. Pueppke S.G., Nurtazin S.T., Murzashev T.K., Galymzhanov I.S., Graham N.A., Konyshbayev T. Re-Establishing Naturally Reproducing Sturgeon Populations in the Caspian Basin: A Wicked Problem in the Ural River // Water. 2023. V. 15. № 19. P. 3399. DOI: 10.3390/w15193399
26. Ruban G.I., Khodorevskaya R.P. Caspian Sea sturgeon fishery: a historic overview // J. Applied Ichthyol. 2009. V. 27. № 2. P. 199–208. DOI: 10.1111/j.1439-0426.2011.01725.x

LONG-TERM DYNAMICS OF ECOLOGICAL AND HYDROLOGICAL PARAMETERS OF THE FUNCTIONING OF STURGEON SPAWNING GROUNDS IN THE MIDDLE REACHES OF THE URAL RIVER

A. A. Chibilev, Zh. T. Sivokhip*, Yu. A. Padalko, V. M. Pavleikhik

Institute of Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, 460000 Russia

**e-mail: sivokhip@mail.ru*

Long-term variations of ecological and hydrological parameters governing the natural reproduction of sturgeon are analyzed. It was found that long-term variations of hydrological characteristics are taking place against the background of cyclic development of phases with different water abundance and transformation of the annual redistribution of runoff. The contribution of long-term runoff regulation by the Iriklienskoe Reservoir to water regime variations in the Ural River is considered for its middle reaches. A conclusion is made regarding the need to restore the sturgeon herd in the Northern Caspian Sea. Recommendations are made regarding the priority measures for preserving the potential of sturgeon spawning grounds in the middle reaches of the Ural River.

Keywords: spawning grounds, sturgeon, hydrological characteristics, runoff regulation, water level, channel deformations.

ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ БАСЕЙНА РЕКИ УРАЛ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

©2024 г. С. В. Яковлев^{а, *}, В. О. Полянин^а, В. С. Болдырев^б, Т. Б. Голоколенова^б,
Ю. В. Басько^б, Л. А. Черешнева^б

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^бВолгоградский филиал ВНИРО, Волгоград, 400001 Россия

*e-mail: Jack_sv@mail.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 02.04.2024 г.

За весь период исследований на водоемах бассейна р. Урал не проводились комплексные гидробиологические исследования большого количества участков как на основных водотоках Урале и Сакмаре, так и на большом числе притоков разного уровня. Рассмотрены результаты таких работ, выполненных в рамках экспедиций институтом водных проблем РАН в летний и осенний периоды 2022 г. Собран и обработан обширный материал по фитопланктону, зоопланктону, зообентосу и молоди рыб.

Ключевые слова: водоемы бассейна реки Урал, мониторинг, гидробиология, фитопланктон, зоопланктон, зообентос, ихтиофауна, гидрология.

DOI: 10.31857/S0321059624050146 EDN: VWPVWF

ВВЕДЕНИЕ

Видовой состав гидробионтов (фитопланктон, зоопланктон, зообентос и ихтиофауна) водных объектов бассейна Урала и их количество в многолетнем аспекте изменялись под влиянием многочисленных абиотических, биотических и антропогенных факторов, которые оказывали влияние на изменение как гидрологического, так и гидрохимического режима рек. Значимость этих факторов на различных участках рек меняется в широком диапазоне, и зачастую они оказывают комплексное влияние.

Урал — одна из наиболее крупных рек Европы, по протяженности — третья после Волги и Дуная. Однако по своей водности она находится примерно на сороковом месте. Физико-географические условия формирования стока таковы, что средний годовой расход воды в р. Урал почти в 20 раз меньше, чем в Волге. Основное питание рек — за счет талых снеговых вод (60–80% объема годового стока), вследствие чего на большинстве рек наблюдается обильное весеннее половодье, дождевые осадки составляют 2–12%, подземные воды — 13–38% [2].

Гидробиологическому изучению р. Урал уделялось мало внимания [1, 3, 5]. В отличие от Волжско-Камского бассейна, для р. Урал имеются лишь отдельные работы, где в разные периоды времени рассматривался планктон некоторых участков: Орск–Оренбург–Илек [1, 5, 6], в районе Ириклинского водохранилища [4].

Проведены две гидробиологические экспедиции. Изменение количественных показателей фитопланктона и зоопланктона имеет тенденцию постепенного увеличения от верхних участков рек к нижним. Индикаторные организмы зообентоса показывают достаточно высокую сопротивляемость водной экосистемы р. Урал к антропогенному загрязнению. Ихтиофауна характеризуется преобладающим значением (по численности) непромысловых видов рыб.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью установления наиболее полной пространственной гидробиологической и ихтиологической характеристики водных объектов бассейна р. Урал в 2022 г. были проведены две

экспедиции. В июле и сентябре 2022 г. выполнены двухэтапные гидробиологические исследования на водных объектах российской части бассейна Урала. Всего в рамках полевых обследований 2022 г. (рис. 1) отобрано 116 проб воды на гидробиологические показатели: 58 проб в июле, 59 проб в сентябре.

Область отбора проб охватила максимальное количество участков от истока до границы с Казахстаном по р. Урал, от истока до устья по основному притоку Урала — р. Сакмаре и по всем основным притокам этих рек. По некоторым створам пробы отбирались в обе экспедиции, по некоторым — только в один из выездов. Всего обследовано 36 водных объектов в бассейне р. Урал.

В результате полевых обследований водных объектов и лабораторной обработки отобранных проб воды дана характеристика четырех основных групп гидробионтов: фитопланктона, зоопланктона, зообентоса, ихтиофауны (по результатам мальковых съемок). Сбор и обработка гидробиологических проб осуществлялись по общепринятым методикам.

По створам обследования собрана база гид-

робиологических данных, которая характеризует численность, биомассу, видовой состав перечисленных групп гидробионтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фитопланктон

По результатам исследований авторов статьи в 2022 г. в видовом составе планктонной флоры в исследованных водных объектах бассейна р. Урал обнаружено 447 таксонов микрофлоры, относящихся к восьми отделам: *Cyanophyta* — 34, *Chrysophyta* — 20, *Bacillariophyta* — 190, *Xanthophyta* — 4, *Cryptophyta* — 14, *Dinophyta* — 13, *Euglenophyta* — 29, *Chlorophyta* — 143. В структуре альгофлоры преобладали представители *Bacillariophyta* — 42.5% от общего состава, *Chlorophyta* — 32%; остальные в сумме составили 25.5%.

В 73% исследованных водных объектов (в 27 объектах из 37) преобладали представители отдела диатомовых водорослей *Bacillariophyta*. Минимальное разнообразие диатомовых отмечено в р. Суундук — 2 таксона; в реках Донгуз, Камсак и Кумакском водохранилище — по 4 таксона; в реках Чаган, Бердянка, Ушкота и оз. Талкас —

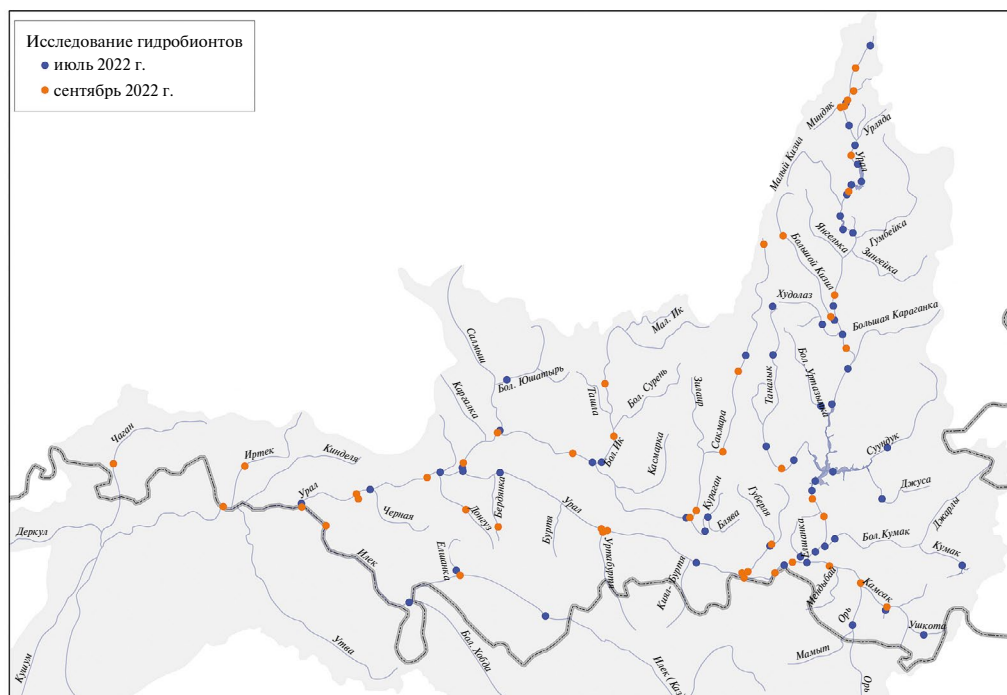


Рис. 1. Места обследования водных объектов и отбора проб на гидробиологические показатели в июле и сентябре 2022 г.

по 5 таксонов; в реках Большой Юшатырь, Урта-Буртя — по 6 таксонов (табл. 1).

Сходство видов левобережных и правобережных притоков — 0.62, собственно р. Урал и ее левобережных притоков — 0.65, р. Урал и правобережных притоков — 0.68. Практически это один фитоценоз.

Удельное богатство фитопланктона по отдельным пробам колебалось от 4 до 56 таксонов. В 72% отобранных проб обнаружено от 11 до 30 видов фитопланктона. Минимальное число видов (<10 таксонов) в пробе отмечено на отдельных створах р. Урал (с. Верхнекизильское, с. Илек), р. Ушкоты (п. Караганда), р. Ори (с. Ащебутак) и р. Суундук (п. Майский). Максимальное число видов (>40 таксонов) отмечено в р. Илек (п. Акоба, с. Покровка, п. Тамар-Уткуль), р. Салмыш (с. Жданово) и р. Урал (г. Новотроицк, с. Ранее).

Численность фитопланктона водных объектов бассейна р. Урал колебалась значительно: от 84 до 536 540 тыс. кл/л (минимум отмечен в р. Урал — п. Нежинка, максимум — в оз. Алабайтал). При этом численность фитопланктона на притоках р. Урал была в диапазоне от 160 тыс. кл/л в р. Ушкота (где большинство составляли диатомовые водоросли, наличие которых характерно для речных водотоков, слабо затронутых антропогенной нагрузкой) до 204 868 тыс. кл/л в р. Таналык — г. Баймак (где отмечено “цветение” синезеленых *Microcystis aeruginosa* (Kütz.)).

В 68% отобранных проб численность фитопланктона составляет <5 000 тыс. кл/л. Средняя численность фитопланктона 5–25 000 тыс. кл/л наиболее характерна для р. Илек, бассейна р. Сакмары ниже впадения р. Большой Ик и бассейна р. Урал ниже г. Оренбурга. Наибольшая численность >25 000 тыс. кл/л наблюдается в следующих створах: р. Таналык ниже ОС г. Баймак, замыкающий створ на р. Салмыш в с. Жданово, р. Илек в с. Покровка (ниже г. Соль-Илецка с неработающими ОС и впадения р. Большая Хобда), Магнитогорское водохранилище в районе правобережных городских ОС, р. Сакмара ниже ОС г. Кувандык, р. Илек в приграничном створе в п. Акоба. Таким образом, выделяются две группы створов с повы-

шенной численностью фитопланктона: а) створы ниже сброса городских сточных вод, особенно в местах с неисправными ОС; б) створы, замыкающие сельскохозяйственно-нагруженные бассейны, что обуславливает поступление биогенов в водные объекты.

Диапазон биомассы водорослей в бассейне р. Урал варьирует от 0.04 (р. Урал — с. Илек) до 27.88 г/м³ (оз. Алабайтал). Основу структуры биомассы, как и численности, во многих створах формировали диатомовые водоросли, однако в реках Камсак, Донгуз, Бердянке, Салмыш, Илек, Иртек, Юшатыри, Чаган, Елшанке, Ушкоте и в некоторых створах р. Урал у больших поселков, таких как Илек, отмечено доминирование фитоплагеллят — чаще зеленых вольвоксовых водорослей и криптофитовых. Эти водоросли, являясь миксотрофами, способны при определенных условиях переходить к потреблению органических веществ, растворенных в воде или находящихся во взвешенном состоянии в виде частиц, что предполагает наличие повышенных концентраций органических и биогенных веществ в воде. Доминанты из диатомей — виды родов *Diatoma*, *Synedra*, *Pinnularia*, *Nitzschia*.

В 72% отобранных проб биомасса фитопланктона ≤2 г/м³. Для верховьев р. Урал и бассейна р. Илек средние величины биомассы фитопланктона — преимущественно 2–5 г/м³. Повышенная биомасса (5–10 г/м³) характерна для створов ниже ОС (р. Таналык ниже ОС г. Баймак и Магнитогорское водохранилище) и створов с сельскохозяйственной нагрузкой (р. Иртек — с. Ташла, р. Салмыш — с. Жданово).

В табл. 2 приведены количественные показатели фитопланктона по всем створам отбора проб. Исследование видового состава и структуры сообществ фитопланктона, численности и биомассы показало, что 57% исследованных участков водных объектов можно отнести к мезотрофному статусу, 41% — к олиготрофному и только в 3% створов отмечено эвтрофирование.

Зоопланктон

По данным исследований авторов статьи в 2022 г., в видовом составе организмов зооплан-

Таблица 1. Таксономический состав фитопланктона исследованных водных объектов

№ пун-кта	Водные объекты (количество точек отбора)	Отделы								Общее коли-чество видов	С какого берега впадает
		<i>Cyanophyta</i>	<i>Chrysophyta</i>	<i>Bacillariophyta</i>	<i>Xanthophyta</i>	<i>Cryptophyta</i>	<i>Dinophyta</i>	<i>Euglenophyta</i>	<i>Chlorophyta</i>		
1	р. Урал (39)	16	10	116	2	13	8	9	96	270	
2	р. Сакмара (14)	7	3	71	1	9	2	4	62	159	Правый
3	р. Илек (6)	10	3	37	-	5	4	2	72	133	Левый
4	р. Губерля (4)	-	7	47	-	10	1	4	16	85	Правый
5	р. Таналык (3)	3	4	36	-	7	1	6	21	78	Правый
6	р. Орь (5)	2	6	29	1	8	-	1	27	74	Левый
7	р. Салмыш (2)	5	-	13	-	4	2	1	33	58	Правый
8	р. Большой Ик (3)	3	2	23	-	6	1	-	14	49	Правый
9	р. Большой Кизил (3)	-	1	31	-	6	1	-	7	46	Правый
10	р. Елшанка, приток р. Илек (1)	3	-	14	-	4	-	3	3	27	Правый
11	р. Елшанка, приток р. Урал (1)	2	-	16	-	1	2	-	-	21	Правый
12	р. Самара (1)	-	-	22	-	3	-	2	11	38	Правый
13	р. Большой Кумак (2)	-	5	13	-	6	4	5	5	38	Левый
14	р. Большой Юшатырь (1)	4	-	6	-	2	1	1	23	37	Правый
15	р. Домбаровка (2)	-	4	18	-	4	-	-	4	30	Левый
16	р. Худолаз (1)	-	1	14	-	4	1	1	8	29	Правый
17	р. Мазанка (1)	-	2	18	-	3	1	1	3	28	Левый
18	р. Миндяк (1)	-	1	19	-	4	-	-	2	26	Правый
19	р. Большая Уртазымка (1)	4	-	11	-	3	-	-	6	24	Правый
20	р. Донгуз (1)	1	4	4	-	5	1	1	5	21	Левый
21	р. Уртабуртя (1)	2	2	6	-	3	1	-	4	18	Левый
22	р. Кандыбулак (1)	-	1	13	-	1	-	1	2	18	Левый
23	р. Джуса (1)	1	-	11	2	3	-	-	1	18	Левый
24	р. Блява (1)	2	-	11	-	1	-	1	2	17	Правый
25	р. Чаган (1)	-	3	5	-	5	1	1	1	16	Правый
26	ер. Старый Урал (р. Солёный) (1)	-	3	7	-	3	-	-	2	15	Левый
27	р. Камсак (1)	1	4	4	-	5	-	-	1	15	Левый
28	р. Кураган (1)	-	-	13	-	1	-	-	-	14	Правый
29	р. Бердянка (1)	-	3	5	-	1	1	-	2	12	Правый
30	р. Суундук (1)	-	1	2	-	2	2	1	2	10	Левый
31	р. Ушкота (1)	-	-	5	-	2	-	-	2	9	Левый
32	оз. Алабайтал (1)	4	2	10	-	7	2	4	11	40	Левый
33	оз. Талкас (1)	3	1	5	-	2	2	-	3	16	Правый
34	Ириклинское вдхр (3)	3	3	26	1	4	1	1	15	54	
35	Магнитогорское вдхр (2)	1	-	27	-	4	-	6	16	54	
36	Верхнеуральское вдхр (3)	4	4	12	-	7	2	-	13	42	
37	Кумакское вдхр (1)	1	2	4	1	4	-	1	21	34	

Таблица 2. Количественные показатели фитопланктона по водным объектам и створам отбора проб

Водный объект	Участок	Виды	Численность, тыс. кл/л	Биомасса, г/м ³
р. Урал – июль				
р. Урал	с. Рысаево	18	203	0.136
	г. Уральск – выше	25	1274	1.474
	д. Москово	31	3060	3.079
	г. Верхнеуральск	35	2856	1.383
	с. Верхнекизильское	8	2385	1.572
	п. Наровчатка	12	1693	0.313
	п. Увальский	14	1527	0.883
	п. Урал	30	3003	2.842
	с. Мусин	27	2323	0.663
	п. Ириклинский	18	482	3.242
	г. Орск	21	1380	0.478
	г. Новотроицк	41	4932	3.276
	п. Урал	37	19771	1.367
	п. Нежинка	30	3925	0.690
	г. Оренбург	29	2340	1.201
	п. Черноречье	26	17377	1.007
	с. Краснохолм	28	18496	1.125
	с. Илек	9	114	0.037
Среднее		24	4841	1.376
Минимальное		8	114	0.037
Максимальное		41	19771	3.276
р. Урал – сентябрь				
р. Урал	с. Рысаево	24	8560	1.516
	с. Ильтебаново	19	1358	1.097
	г. Уральск	23	2448	2.193
	г. Уральск – ниже	22	871	0.855
	г. Верхнеуральск	20	3451	1.199
	п. Кожанов	22	1232	2.231
	п. Приморский	16	1484	0.513
	п. Сыртинский	30	15560	2.856
	п. Грязнушинский	13	835	0.263
	п. Уральск	10	451	0.061
	с. Колпакское	13	540	0.365
	г. Орск	22	1852	1.863
	с. Хабарное	31	4158	4.428
	с. Казачья Губерля	29	12936	2.608
	п. Урал	24	3132	1.417
	с. Жанаталап	22	476	0.216
	с. Алабайтал	26	1892	1.271
	п. Нежинка	4	84	0.205
	п. Шуваловский	28	1708	0.534
	с. Нижнеозерное	33	4500	1.254
ер. Старый Урал (р. Солёный)	с. Кардаилово	15	1848	1.058
р. Урал	с. Илек	22	13325	2.140
	с. Раннее	45	22530	2.589
Среднее		22	4575	1.423
Минимальное		4	84	0.061
Максимальное		45	22530	4.428

Таблица 2. Продолжение

Водный объект	Участок	Виды	Численность, тыс. кл/л	Биомасса, г/м ³
р. Сакмара – июль				
р. Сакмара	с. Сайгафар	11	356	0.334
	с. Рамазаново	34	24272	1.777
	г. Кувандык	40	32164	3.873
	с. Татарский Саракташ	28	13207	1.337
	г. Оренбург	38	17412	1.624
Среднее		30	17482	1.789
Минимальное		11	356	0.334
Максимальное		40	32164	3.873
р. Сакмара – сентябрь				
р. Сакмара	с. Ахметово	13	748	1.253
	с. Сайгафар	22	2618	1.631
	с. Абдулкаримово	26	14059	6.089
	с. Янтышево	22	2654	1.810
	с. Рамазаново	14	778	1.333
	г. Кувандык	31	4932	1.291
	с. Федоровка-1я	18	16403	0.620
	п. Сакмара	31	8375	1.848
	г. Оренбург	20	2022	0.201
Среднее		22	5843	1.786
Минимальное		13	748	0.201
Максимальное		31	16403	6.089
Водохранилища на р. Урал – июль				
Верхнеуральское вдхр	п. Спасский	25	8233	2.415
Верхнеуральское вдхр	п. Ивановский	11	1580	0.565
Верхнеуральское вдхр	п. Приморский	13	12783	2.130
Магнитогорское вдхр	г. Магнитогорск	32	5370	4.204
Магнитогорское вдхр	Магнитогорские ОС	26	32436	15.256
Ириклинское вдхр	с. Уртазым	28	4157	1.415
Ириклинское вдхр	п. Энергетик	16	1769	0.153
Ириклинское вдхр	б/о Вишневые горки	23	2101	0.757
Среднее		22	8554	3.362
Минимальное		11	1580	0.153
Максимальное		32	32436	15.256
р. Кандыбулак – приток Урала				
р. Кандыбулак	с. Базаргулово	18	946	1.665
р. Миндяк – приток Урала				
р. Миндяк	с. Новобайрамгулово	26	2670	2.382
р. Большой Кизил – приток Урала				
р. Большой Кизил	с. Тирмен	16	1747	4.706
	с. Кизильское – выше	23	1383	0.759
	с. Кизильское	22	915	0.688
Среднее		20	1348	2.051
Минимальное		16	915	0.688
Максимальное		23	1747	4.706
р. Таналык – приток Урала				
оз. Талкас	п. Исяново	16	8986	0.545
р. Таналык	г. Баймак	23	204864	18.998

Таблица 2. Продолжение

Водный объект	Участок	Виды	Численность, тыс. кл/л	Биомасса, г/м ³
	п. Бурибай	16	1640	0.539
	с. Новый Зирган	24	1416	0.667
	с. Мамбетово	34	16389	6.087
Среднее		23	46659	5.367
Минимальное		16	1416	0.539
Максимальное		34	204864	18.998
р. Худолаз – приток Урала				
р. Худолаз	с. Калинино	29	1673	0.813
р. Большая Уртазымка – приток Урала				
р. Большая Уртазымка	с. Сосновка	24	5985	0.780
р. Суундук – приток Урала				
р. Суундук	п. Майский	10	192	0.130
р. Джуса – приток Урала				
р. Джуса	п. Слюдяной	18	524	0.422
р. Большой Кумак – приток Урала				
Кумакское водохр	п. Кумак	34	6387	1.248
р. Большой Кумак	п. Кумак	17	926	0.542
	п. Ударник	25	5906	3.098
	п. Ударник	27	3228	1.560
Среднее		26	4112	1.612
Минимальное		17	926	0.542
Максимальное		34	6387	3.098
р. Ор с притоками – приток Урала – июль				
р. Ушкота	п. Караганда	9	160	0.291
р. Домбаровка	п. Голубой Факел	15	672	0.174
р. Ор	п. Полевой	31	15552	0.821
	г. Орск	25	1276	1.313
Среднее		20	4415	0.650
Минимальное		9	160	0.174
Максимальное		31	15552	1.313
р. Ор с притоками – приток Урала – сентябрь				
р. Домбаровка	п. Голубой Факел	18	1386	2.042
р. Камсак	п. Голубой Факел	15	457	0.470
р. Ор	п. Полевой	15	1870	0.896
	с. Ащебутак	10	565	0.396
	п. Тукай	18	1552	0.276
Среднее		15	1166	0.816
Минимальное		10	457	0.276
Максимальное		18	1870	2.042
р. Елшанка – приток Урала				
р. Елшанка	г. Орск	21	1880	0.280
р. Губерля – приток Урала				
р. Губерля	с. Узембаево	25	3396	2.307
	с. Узембаево	36	705	0.281
	с. Казачья Губерля	22	1619	0.471
	с. Казачья Губерля	35	2068	1.014
Среднее		30	1947	1.018
Минимальное		22	705	0.281

Таблица 2. Окончание

Водный объект	Участок	Виды	Численность, тыс. кл/л	Биомасса, г/м³
Максимальное		36	3396	2.307
оз. Алабайтал – старица Урала				
оз. Алабайтал	с. Алабайтал	40	536540	27.884
р. Уртабуртя – приток Урала				
р. Уртабуртя	с. Жанаталап	18	1155	0.594
р. Бердянка – приток Урала				
р. Бердянка	с. Михайловка	12	1868	0.424
р. Донгуз – приток Урала				
р. Донгуз	п. Экспериментальный	21	4788	1.364
р. Илек с притоками – приток Урала – июль				
р. Илек	п. Акоба	56	26792	2.569
р. Елшанка	г. Соль-Илецк	27	9360	3.906
р. Илек	с. Покровка	41	62342	3.782
	с. Илек	39	29168	7.886
Среднее		41	31916	4.536
Минимальное		27	9360	2.569
Максимальное		56	62342	7.886
р. Илек с притоками – приток Урала – сентябрь				
р. Илек	п. Тамар-Уткуль	45	6835	2.218
р. Мазанка	с. Привольное	28	1567	1.151
р. Илек	с. Привольное	24	6349	1.037
	с. Илек	36	21760	3.643
Среднее		33	9128	2.012
Минимальное		24	1567	1.037
Максимальное		45	21760	3.643
р. Иртек – приток Урала				
р. Иртек	с. Ташла	17	5600	8.081
р. Чаган – приток Урала				
р. Чаган	п. Таловый	16	2056	0.731
р. Кураган с притоками – приток Сакмары				
р. Блява	п. Блявтамак	17	1747	0.167
р. Кураган	с. Рысаево	14	2195	0.451
р. Салмыш с притоками – приток Сакмары				
р. Большой Юшатырь	с. Октябрьское	37	15571	1.986
р. Салмыш	с. Жданово	47	168753	6.271
	с. Жданово	16	1156	0.408
Среднее		33	61827	2.888
Минимальное		16	1156	0.408
Максимальное		47	168753	6.271
р. Большой Ик – приток Сакмары				
р. Большой Ик	с. Туембетово	16	1136	0.798
	с. Спасское	22	991	0.241
	с. Васильевка	20	5088	1.036
Среднее		19	2405	0.692
Минимальное		16	991	0.241
Максимальное		22	5088	1.036

Таблица 3. Динамика численности и биомассы отдельных групп зоопланктона на реках и водохранилищах Урала в 2022 г. (N – численность, тыс. экз/м³, B – биомасса, мг/м³)

Месяц	Коловратки		Кладоцеры		Копеподы		Весь зоопланктон	
	N	B	N	B	N	B	N	B
Реки								
Июль	0.19	0.42	0.46	12.13	1.01	19.12	1.66	31.66
Сентябрь	0.20	0.40	2.0	8.8	1.0	10.2	3.2	19.4
В среднем за период наблюдений	0.195	0.41	1.23	10.97	1.01	14.66	2.43	25.53
Водохранилища								
Июль	4.28	19.49	1.27	120.62	6.56	80.26	12.11	220.36
Реки и водохранилища								
Июль	0.81	3.32	0.60	28.55	1.87	29.75	3.28	61.62

ктона в исследованных водных объектах бассейна р. Урал обнаружено 53 вида, относящихся к трем группам: *Rotatoria* – 23, *Cladocera* – 18, *Copepoda* – 12. В пробах часто присутствовали веслоногие науплиальных и копепоидитных стадий развития. Среди коловраток чаще всего встречались *Euchlanis dilatata* и *Keratella quadrata*. У кладоцер в пробах преобладали *Bosmina longirostris* и *Chydorus ovalis*.

В 23% отобранных проб обнаружено ≤ 2 видов зоопланктона. При этом только по одному виду зоопланктона найдено в пробах воды в трех створах на р. Большой Ик, в п. Бурибай на р. Таналык, в п. Акоба на р. Илек, в с. Казачья Губерля на р. Губерле, в с. Мусин и п. Ириклинский на р. Урал, в с. Ащебутак на р. Ори и в с. Сосновка на р. Большая Уртазымка. Наибольшее количество (9–10) видов наблюдалось в с. Уртазым на Ириклинском водохранилище, в п. Ивановском на Верхнеуральском водохранилище, в п. Майском на р. Суундук.

При температуре воды в водоемах в июле от 16.0 до 28.0°C уровень развития зоопланктона был невысоким. По численности и биомассе преобладали веслоногие ракообразные: 1.01 тыс. экз/м³ и 19.12 мг/м³ соответственно. Коловратки и кладоцеры были представлены в меньших количествах (табл. 3).

В водоемах в июле по численности преобладали копепоиды, по биомассе – кладоцеры. Температура воды в водохранилищах была в пределах 21.0–29.0°C. Общая численность

и биомасса зоопланктоценоза водохранилищ в июле составила 12.11 тыс. экз/м³ и 220.36 мг/м³ соответственно.

В сентябре на реках температура воды была от 3.5 до 18.0°C. Численность коловраток и копепоид осталась на том же уровне, численность кладоцер увеличилась в ~2 раза. Биомасса коловраток осталась практически такой же, как и в июле, биомасса кладоцер и копепоид уменьшилась.

В целом, уровень развития зоопланктона в период исследований невысокий, водоемы можно отнести к “малокормным”.

Количественные показатели зоопланктона по водным объектам и створам отбора проб приведены в табл. 4.

В 69% отобранных проб биомасса зоопланктона составляет < 10 г/м³. Наибольшая биомасса (> 100 г/м³) характерна для Верхнеуральского, Магнитогорского и Кумакского водохранилищ, верховьев Ириклинского водохранилища, оз. Талкас, рек Суундук, Камсак, Джусы, устья р. Большой Кумак, р. Донгуз.

Зообентос

Биоразнообразие бентофауны на всех исследованных участках водотоков и водоемов за все периоды наблюдений было достаточно велико – 219 видов и форм донных беспозвоночных для водотоков и 55 для водоемов.

Таблица 4. Количественные показатели зоопланктона по водным объектам и створам отбора проб (экспедиции (Э): 1 – июльская, 2 – сентябрьская)

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ³	Биомасса, г/м ³	Виды
р. Урал – июль						
1	1	р. Урал	с. Рысаево	1440	51.68	7
2	1		г. Уральск – выше	370	0.88	3
3	1		д. Москово	160	2.38	4
4	1		г. Верхнеуральск	160	1.03	4
5	1		с. Верхнекизильское	620	9.54	5
6	1		п. Наровчатка	580	5.73	5
7	1		п. Увальский	970	48.66	7
8	1		п. Урал	260	5.46	2
9	1		с. Мусин	170	0.68	1
10	1		п. Ириклинский	170	0.68	1
11	1		г. Орск	530	12.23	4
12	1		г. Новотроицк	1680	12.98	8
13	1		п. Урал	800	8.32	2
14	1		п. Нежинка	620	14.72	8
15	1		г. Оренбург	140	0.97	6
16	1		п. Черноречье	720	21.52	8
17	1		с. Краснохолм	400	12.81	6
18	1		с. Илек	230	4.53	5
		Среднее		557	12	5
		Максимальное		1680	51.68	8
		Минимальное		140	0.68	1
р. Урал – сентябрь						
19	2		с. Рысаево	60	0.45	2
20	2		с. Ильтебаново	90	0.57	3
21	2		г. Уральск	190	2.35	4
22	2		г. Уральск – ниже	190	2.35	4
23	2		г. Верхнеуральск	90	0.51	3
24	2		п. Кожанов	100	3.62	2
25	2		п. Приморский	250	2.12	5
26	2		п. Сыртинский	100	3.62	2
27	2		п. Грязнушинский	800	2.77	3
28	2		п. Уральск	320	3.96	4
29	2		с. Колпакское	330	9.53	5
30	2		г. Орск	1940	88.44	6
31	2		с. Хабарное	430	14.53	5
32	2		с. Казачья Губерля	390	12.21	5
33	2		п. Урал	400	15.85	3
34	2		с. Жанаталап	340	4.99	4
35	2		с. Алабайтал	470	5.69	5
36	2		п. Нежинка	300	2.83	5
37	2		п. Шуваловский	150	2.49	5
38	2		с. Нижнеозерное	70	0.95	3
39	2	ер. Старый Урал (р. Солёный)	с. Кардаилово	1110	19.75	6
40	2	р. Урал	с. Илек	70	0.49	3
41	2		с. Раннее	120	2.07	4
		Среднее		361	8.79	4
		Максимальное		1940	88.44	6

Таблица 4. Продолжение

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ³	Биомасса, г/м ³	Виды
		Минимальное		60	0.45	2
р. Сакмара – приток р. Урал – июль						
42	1	р. Сакмара	с. Сайгафар	310	2.97	5
43	1		с. Рамазаново	120	2.07	4
44	1		г. Кувандык	320	3.96	4
45	1		с. Татарский Саракташ	0	0.00	0
46	1		г. Оренбург	280	11.48	4
		Среднее		206	4.10	3
		Максимальное		320	11.5	5
		Минимальное		0	0.00	0
р. Сакмара – приток р. Урал – сентябрь						
47	2	р. Сакмара	с. Ахметово	340	2.05	2
48	2		с. Сайгафар	1960	3.31	6
49	2		с. Абдулкаримово	3970	7.07	6
50	2		с. Янтышево	0	0.00	0
51	2		с. Рамазаново	0	0.00	0
52	2		г. Кувандык	160	3.56	4
53	2		с. Федоровка-1я	150	5.04	5
54	2		п. Сакмара	0	0.00	0
55	2		г. Оренбург	60	0.45	2
		Среднее		738	2.39	3
		Максимальное		3970	7.07	6
		Минимальное		0	0.00	0
Водохранилища на р. Урал						
56	1	Верхнеуральское	п. Спасский	10280	152.39	8
57	1		п. Ивановский	10860	870.20	9
58	1		п. Приморский	30140	386.04	8
59	1	Магнитогорское	г. Магнитогорск	460	4.82	5
60	1		Магнитогорские ОС	24170	227.91	7
61	1	Ириклинское	с. Уртазым	2940	114.43	10
62	1		п. Энергетик	1230	7.61	3
63	1		б/о Вишневые горки	2730	12.72	5
		Среднее		10351	222.0	7
		Максимальное		30140	870.2	10
		Минимальное		460	4.8	3
р. Кандыбулак – приток р. Урал						
64	2	р. Кандыбулак	с. Базаргулово	670	3.17	3
р. Миндяк – приток р. Урал						
65	2	р. Миндяк	с. Новобайрамгулово	730	27.30	2
р. Большой Кизил – приток р. Урал						
66	2	р. Большой Кизил	с. Тирмен	110	0.38	3
67	2		с. Кизильское – выше	240	0.82	4
68	1		с. Кизильское	120	3.20	3
		Среднее		157	1.47	3
		Максимальное		240	3.20	4
		Минимальное		110	0.38	3
р. Таналык – приток р. Урал						
69	1	оз. Талкас	п. Исяново	3010	100.76	4

Таблица 4. Продолжение

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ³	Биомасса, г/м ³	Виды
70	1	р. Таналык	г. Баймак	940	12.28	4
71	1		п. Бурибай	30	0.06	1
72	2		с. Новый Зирган	370	7.13	4
73	1		с. Мамбетово	670	7.23	6
		Среднее		1004	25.49	4
		Максимальное		3010	100.76	6
		Минимальное		30	0.06	1
р. Худолаз – приток р. Урал						
74	1	р. Худолаз	с. Калинино	0	0.00	0
р. Большая Уртазымка						
75	1	р. Большая Уртазымка	с. Сосновка	70	3.50	1
р. Суундук – приток р. Урал						
76	1	р. Суундук	п. Майский	26080	753.03	9
р. Джуса – приток р. Суундук						
77	1	р. Джуса	п. Слюдяной	6920	140.04	8
р. Большой Кумак – приток р. Урал						
78	1	Кумакское водохр	п. Кумак	26210	207.14	8
79	1	р. Большой Кумак	п. Кумак	560	2.56	2
80	1		п. Ударник	24690	201.10	7
81	2		п. Ударник	540	6.93	3
		Среднее		13000	104.43	5
		Максимальное		26210	207.14	8
		Минимальное		540	2.56	2
р. Орь с притоками – приток р. Урал – июль						
82	1	р. Ушкота	п. Караганда	3200	81.04	7
83	1	р. Домбаровка	п. Голубой Факел	590	5.93	6
84	1	р. Орь	п. Полевой	270	23.30	2
85	1		г. Орск	280	2.99	7
		Среднее		1085	28.32	6
		Максимальное		3200	81.04	7
		Минимальное		270	2.99	2
р. Орь с притоками – приток р. Урал – сентябрь						
86	2	р. Домбаровка	п. Голубой Факел	290	7.74	6
87	2	р. Камсак	п. Голубой Факел	10000	301.41	5
88	2	р. Орь	п. Полевой	1270	25.94	5
89	2		с. Ащебутак	30	1.50	1
90	2		п. Тукай	260	2.77	4
		Среднее		2370	67.87	4
		Максимальное		10000	301.4	6
		Минимальное		30	1.50	1
р. Елшанка – приток р. Урал						
91	1	р. Елшанка	г. Орск	120	3.54	4
р. Губерля – приток р. Урал						
92	2	р. Губерля	с. Узембаево	1090	10.01	4
93	1		с. Узембаево	740	1.82	3
94	2		с. Казачья Губерля	200	0.40	1
95	2		с. Казачья Губерля	330	0.99	3

Таблица 4. Окончание

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ³	Биомасса, г/м ³	Виды
Среднее				590	3.31	3
Максимальное				1090	10.01	4
Минимальное				200	0.40	1
оз. Алабайтал – старица р. Урал						
96	2	оз. Алабайтал	с. Алабайтал	20460	116.02	5
р. Уртабуртя – приток р. Урал						
97	2	р. Уртабуртя	с. Жанаталап	160	5.45	3
р. Бердянка – приток р. Урал						
98	2	р. Бердянка	с. Михайловка	2400	42.50	5
р. Донгуз – приток р. Урал						
99	2	р. Донгуз	п. Экспериментальный	53060	438.91	7
р. Илек с притоками – приток р. Урал – июль						
100	1	р. Илек	п. Акоба	330	0.30	1
101	1	р. Елшанка	г. Соль-Илецк	90	0.57	3
102	1	р. Илек	с. Покровка	260	0.41	2
103	1		с. Илек	0	0.00	0
		Среднее		170	0.32	2
		Максимальное		330	0.57	3
		Минимальное		0	0.00	0
р. Илек с притоками – приток р. Урал – сентябрь						
104	2	р. Илек	п. Тамар-Уткуль	100	3.65	2
105	2	р. Мазанка	с. Привольное	560	6.66	6
106	2	р. Илек	с. Привольное	160	0.86	3
107	2		с. Илек	160	2.39	4
		Среднее		245	3.39	4
		Максимальное		560	6.66	6
		Минимальное		100	0.86	2
р. Иртек – приток р. Урал						
108	2	р. Иртек	с. Ташла	470	4.20	2
р. Чаган – приток р. Урал						
109	2	р. Чаган	п. Таловый	40	0.33	2
р. Кураган с притоками – приток р. Сакмара						
110	1	р. Блява	п. Блявтамак	0	0.00	0
111	1	р. Кураган	с. Рысаево	2300	5.64	2
р. Салмыш с притоками – приток р. Сакмара						
112	1	р. Большой Юшатырь	с. Октябрьское	320	1.03	5
113	1	р. Салмыш	с. Жданово	0	0.00	0
114	2		с. Жданово	0	0.00	0
		Среднее		107	0.34	2
		Максимальное		320	1.03	5
		Минимальное		0	0.00	0
р. Большой Ик – приток р. Сакмара						
115	2	р. Большой Ик	с. Туембетово	100	0.20	1
116	2		с. Спасское	70	0.14	1
117	1		с. Васильевка	30	0.15	1
		Среднее		67	0.16	1
		Максимальное		100	0.20	1
		Минимальное		30	0.14	1

В 86% проб встречалось от 3 до 20 видов бентоса. Наименьшее количество (1–2) видов обнаружено в створах на р. Бляве в п. Блявтамак, на р. Урал в городах Орске и Илеке, на р. Илек в с. Илек, на р. Таналык в п. Бурибай. Наибольшее количество (>25) видов обнаружено в створах на р. Большой Кизил в с. Тирмен, на р. Камсак в п. Голубой Факел, на р. Урал ниже г. Уральска, на р. Таналык в с. Новый Зирган.

Численность бентосных организмов в пробах варьирует в значительных пределах. Среди прочих здесь выделяются два створа — на р. Таналык ниже г. Баймак и на р. Урал в п. Урал (Оренбургская обл.).

По суммарной биомассе выделяют створы в приграничной части бассейна — р. Илек в с. Илек и р. Урал в с. Черноречье.

Преимущественным биотопом на исследованных участках водотоков (рек) был каменисто-песчаный грунт, иногда с примесью ила или детрита.

Наибольшая численность ($72\,080$ экз/м²) общего зообентоса отмечена в р. Таналык ниже г. Баймак в месте локального скопления личинок хирономид, преимущественно видов *Sindiamesa nivosa* и *Chironomus plumosus*. Максимальные показатели биомассы бентосных организмов (1807 г/м²) отмечены на одном из исследованных участков на р. Урал — в с. Черноречье и складывались в основном за счет крупных моллюсков *Unio pictorum* и *Anodonta piscinalis*. Минимальные численность и биомасса бентофауны (32 экз/м² и 0.048 г/м²) зафиксированы в р. Бляве.

Анализ встречаемости групп организмов бентоса по июльским данным показал, что представители группы хирономид встречаются практически повсеместно (92% створов), затем следуют олигохеты (77%) и поденки (60%). Остальные группы встречаются на $<40\%$ створов. Хирономиды также преобладают по видовому разнообразию. На разных створах встречается от 1 до 7 видов хирономид (в среднем 4), в то время как остальные группы организмов представлены чаще всего одним-двумя видами, в редких случаях до 4.

Осенью пределы колебаний количества видов по водотокам составляли от 3 (р. Илек — с. Илек, р. Сакмара — г. Оренбург) до 34 (р. Большой Кизил — с. Тирмен). Максимум биомассы донной фауны водотоков в осенний период отмечается на р. Урал в пределах с. Ильтебаново (1370 г/м²) из-за интенсивного развития крупных двустворчатых моллюсков и на р. Илек — с. Илек (1907 г/м²). Наиболее высокой численностью (19 тыс. экз/м²) характеризовался участок р. Урал возле г. Орска. Самые низкие количественные показатели по водотокам отмечались в р. Сакмаре в районе г. Оренбурга (64 экз/м² и 0.096 г/м²) и складывались исключительно из экологически пластичных видов, типичных пеллофилов — личинок хирономид и олигохет.

На исследованных участках водоемов (озер и водохранилищ) основным биотопом был заилено-песчаный грунт с небольшим количеством галечника и примесью детрита. Зообентос исследованных водоемов за все периоды наблюдений был значительно беднее в сравнении с речной бентофауной и включал 55 видов и форм донных беспозвоночных.

Количество видов в водоемах летом варьирует от 4 в оз. Талкас до 22 в Ириклинском водохранилище. Наиболее высокие показатели общей численности (26720 экз/м²) отмечаются в Кумакском водохранилище. Максимальная биомасса (377 г/м²) зафиксирована в Магнитогорском водохранилище в г. Магнитогорске, на 93% ее составляют моллюски, большей частью *Unio pictorum* (Linne). Наиболее низкие количественные показатели бентоса отмечаются в оз. Талкас. На 1 м² площади дна здесь насчитывалось в среднем 96 экземпляров донных организмов массой 0.11 г.

В осенний период отбор проб из водоемов проводился на оз. Алабайтал. Фауна макробентоса озера представлена шестью видами беспозвоночных: *Chironomus plumosus*, *Procladius ferrugineus*, *Cryptochironomus ussouriensis*, *Polypedilum nubeculosum*, *Limnodrilus udekemianus* и *Unio pictorum*. Численность и биомасса донной фауны исследованного водоема составили 9600 экз/м² и 6185 г/м² соответственно.

Таблица 5. Количественные показатели зообентоса по водным объектам и створам отбора проб (экспедиции (Э): 1 – июльская, 2 – сентябрьская)

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ²	Биомасса, г/м ²	Виды
р. Урал						
1	1	р. Урал	с. Рысаево	24000	69.9	7
2	2		с. Рысаево	10160	21.6	8
3	2		с. Ильтебаново	12600	1369.6	21
4	2		г. Уральск	880	4.1	10
5	1		г. Уральск – выше	108.8	11.7	16
6	2		г. Уральск – ниже	3680	377.7	26
7	1		д. Москово	4760	38.2	9
8	1		г. Верхнеуральск	3320	3.6	11
9	2		г. Верхнеуральск	912	4.8	14
10	2		п. Кожанов	1280	7.4	7
11	2		п. Приморский	1160	6.8	8
12	1		с. Верхнекизильское	7760	136.9	14
13	1		п. Наровчатка	3216	5.3	13
14	2		п. Сыртинский	288	0.9	5
15	1		п. Увальский	2992	9.5	12
16	1		п. Урал	22720	29.8	13
17	2		п. Грязнушинский	3904	18.0	17
18	1		п. Мусин	2880	9.6	9
19	1		п. Ириклинский	6366.4	314.7	11
20	2		п. Уральск	13936	79.4	9
21	2		с. Колпакское	2160	9.7	16
22	1		г. Орск	640	1.3	1
23	2		г. Орск	19040	10.5	10
24	1		г. Новотроицк	1200	5.2	10
25	2		с. Хабарное	240	545.8	7
26	2		с. Казачья Губерля	864	361.8	12
27	2		п. Урал	14800	511.0	14
28	1		п. Урал	48800	93.6	9
29	2		с. Жанаталап	6736	216.6	25
30	2		с. Алабайтал	512	0.6	11
31	2		п. Нежинка	608	0.6	11
32	1		п. Нежинка	400	1.1	7
33	1		г. Оренбург	1880	536.1	11
34	1		п. Черноречье	5200	1806.7	15
35	2		п. Шуваловский	3248	29.9	17
36	1		с. Краснохолм	2640	943.2	16
37	2		с. Нижнеозерное	2336	286.1	15
38	2	ер. Старый Урал (р. Солёный)	с. Кардаилово	224	0.3	9
39	1	р. Урал	с. Илек	160	0.5	2
40	2		с. Илек	928	257.6	13
41	2		с. Раннее	800	3.3	7
		Среднее		5862	198.6	12
		Максимальное		48800	1806.7	26
		Минимальное		108.8	0.3	1
р. Сакмара						
42	2	р. Сакмара	с. Ахметово	8440	35.6	7
43	1		с. Сайгафар	4608	26.4	14

Таблица 5. Продолжение

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ²	Биомасса, г/м ²	Виды
44	2		с. Сайгафар	64	0.1	4
45	2		с. Абдулкаримово	4368	23.0	16
46	2		с. Янтышево	2864	5.5	15
47	2		с. Рамазаново	336	1.6	9
48	2		г. Кувандык	224	0.6	7
49	1		г. Кувандык	4280	6.5	12
50	1		с. Татарский Саракташ	3720	8.4	9
51	2		с. Федоровка-1я	1312	3.3	14
52	2		п. Сакмара	4320	198.4	13
53	2		г. Оренбург	64	0.1	3
54	1		г. Оренбург	200	0.4	4
		Среднее		2677	23.8	10
		Максимальное		8440	198.4	16
		Минимальное		64	0.1	3
Водохранилища на р. Урал						
55	1	Верхнеуральское	п. Спасский	1960	2.1	8
56	1		п. Ивановский	2520	2.6	7
57	1		п. Приморский	3800	4.0	5
58	1	Магнитогорское	г. Магнитогорск	19320	377.3	16
59	1		Магнитогорские ОС	7280	9.1	4
60	1	Ириклинское	с. Уртазым	9320	199.3	19
61	1		п. Энергетик	6680	22.8	6
62	1		б/о Вишневые горы	1520	1.8	8
		Среднее		6550	77.4	9
		Максимальное		19320	377.3	19
		Минимальное		1520	1.8	4
р. Кандыбулак – приток Урала						
63	2	р. Кандыбулак	с. Базаргулово	1160	9.2	7
р. Миндяк – приток Урала						
64	2	р. Миндяк	с. Новобайрамгулово	1328	9.5	18
р. Большой Кизил – приток Урала						
65	2	р. Большой Кизил	с. Тирмен	4576	35.2	34
66	2		с. Кизильское – выше	2704	11.4	17
67	1		с. Кизильское	160	0.2	7
		Среднее		2480	16	19
		Максимальное		4576	35.2	34
		Минимальное		160	0.2	7
р. Таналык – приток Урала						
68	1	оз. Талкас	п. Исяново	96	0.1	4
69	1	р. Таналык	г. Баймак	72080	329.0	17
70	1		п. Бурибай	600	0.8	2
71	2		с. Новый Зирган	8080	74.6	26
72	1		с. Мамбетово	10160	27.9	10
		Среднее		18203	86.5	12
		Максимальное		72080	329.0	26
		Минимальное		96	0.1	2
р. Худолаз – приток Урала						
73	1	р. Худолаз	с. Калинино	10880	310.2	15
р. Большая Уртазымка – приток Урала						

Таблица 5. Продолжение

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ²	Биомасса, г/м ²	Виды
74	1	р. Большая Уртазымка	с. Ургаза	1000	1.5	11
р. Суундук – приток Урала						
75	1	р. Суундук	п. Майский	1960	14.2	11
р. Джуса – приток р. Суундук						
76	1	р. Джуса	п. Слюдяной	6320	182.2	23
р. Большой Кумак – приток Урала						
77	1	Кумакское вдхр	п. Кумак	26720	46.9	9
78	1	р. Большой Кумак	п. Кумак	3280	11.5	11
79	1		п. Ударник	2400	10.7	11
		Среднее		10800	23	10
		Максимальное		26720	46.9	11
		Минимальное		2400	10.7	9
р. Орь с притоками – приток Урала						
80	1	р. Ушкота	п. Караганда	21920	86.3	12
81	1	р. Домбаровка	п. Голубой Факел	12600	40.0	7
82	2		п. Голубой Факел	11680	235.8	17
83	2	р. Камсак	п. Голубой Факел	18960	183.4	27
84	1	р. Орь	п. Полевой	11280	28.7	11
85	2		п. Полевой	10000	21.6	12
86	2		с. Ашебутак	208	131.5	6
87	2		п. Тукай	1904	29.5	16
88	1		г. Орск	3240	17.4	11
		Среднее		10199	86.0	13
		Максимальное		21920	235.8	27
		Минимальное		208	17.4	6
р. Елшанка – приток Урала						
89	1	р. Елшанка	г. Орск	880	5.3	14
р. Губерля – приток Урала						
90	2	р. Губерля	с. Узембаево	4000	71.7	23
91	1		с. Узембаево	4800	4.9	12
92	2		с. Казачья Губерля, выше села	9680	61.9	15
93	2		с. Казачья Губерля, ниже села	5408	32.4	21
		Среднее		5972	42.7	18
		Максимальное		9680	71.7	23
		Минимальное		4000	4.9	12
оз. Алабайтал – старица Урала						
94	2	оз. Алабайтал	с. Алабайтал	9600	6185.2	6
р. Уртабуртя – приток Урала						
95	2	р. Уртабуртя	с. Жанаталап	144	0.8	4
р. Бердянка – приток Урала						
96	2	р. Бердянка	с. Михайловка	3480	20.4	14
р. Донгуз – приток Урала						
97	2	р. Донгуз	п. Экспериментальный	1680	256.8	6
р. Илек с притоками – приток Урала						
98	1	р. Илек	п. Акоба	144	0.5	4
99	2		п. Тамар-Уткуль	760	2.2	7
100	1	р. Елшанка	г. Соль-Илецк	5200	13.4	5
101	1	р. Илек	с. Покровка	240	790.3	3
102	2	р. Мазанка	с. Привольное	2520	93.2	13

Таблица 5. Окончание

№	Э	Водный объект	Участок	Численность, шт/м ²	Биомасса, г/м ²	Виды
103	2	р. Илек	с. Привольное	1120	1.8	4
104	1		с. Илек	40	0.2	1
105	2		с. Илек	480	1907.2	3
		Среднее		1313	351.1	5
		Максимальное		5200	1907.2	13
		Минимальное		40	0.2	1
р. Иртек – приток Урала						
106	2	р. Иртек	с. Ташла	760	3.0	7
р. Чаган – приток Урала						
107	2	р. Чаган	п. Таловый	12800	13.0	4
р. Кураган с притоками – приток Сакмары						
108	1	р. Блява	п. Блявтамак	32	0.0	1
109	1	р. Кураган	с. Рысаево	256	0.4	6
р. Салмыш с притоками – приток Сакмары						
110	1	р. Большой Юшатырь	с. Октябрьское	1536	7.5	9
111	1	р. Салмыш	с. Жданово	2120	796.4	9
112	2		с. Жданово	6800	72.4	15
		Среднее		3485	292	11
		Максимальное		6800	796.4	15
		Минимальное		1536	7.5	9
р. Большой Ик – приток Сакмары						
113	2	р. Большой Ик	с. Туембетово	3392	34.4	21
114	2		с. Спасское	1840	10.3	22
115	1		с. Васильевка	1104	15.1	10
		Среднее		2112	20	18
		Максимальное		3392	34.4	22
		Минимальное		1104	10.3	10

Максимальная разовая численность организмов (≥ 10 тыс. шт/м²) отмечена по следующим видам: жуки *Haliphus sp.*, олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri* и *Potamothrix moldaviensis*, хирономиды *Sindiamesa nivosa* и *Chironomus plumosus*, поденки *Caenis macrura*, олигохеты *Limnodrilus claparedeanus* и хирономиды *Micropsectra praecox*.

Максимальная биомасса (> 100 г/м²) зафиксирована по видам: моллюски-дв. *Unio pictorum*, *Unio sp.*, *Tumidiana tumida*, *Anodonta piscinalis* и *Dreissena polymorpha*, моллюски бр. *Lymnaea stagnalis*, ракообразные *Chaetogammarus warpachowskyi*, пиявки *Herpobdella octoculata*.

Количественные показатели зообентоса по всем створам представлены в табл. 5.

Ихтиофауна

В 2022 г. в период летних и осенних исследований в общей сложности было обнаружено 30 видов молоди рыб, относящихся к девяти семействам – карповым, вьюновым, шуковым, головешковым, иглам-рыбам, колюшковым, окуневым, бычковым, тресковым.

Доминирующее семейство как по числу видов, так и по показателям биомассы и численности особей рыб – карповые (19 видов). На втором месте по числу видов – вьюновые (3 вида), которые по количественным показателям значительно уступают окуневым с представителями двух видов. Остальные семейства представлены единичными видами.

Встречаемость разных видов ихтиофауны представлена на графике (на рис. 2). Представители семейства карповых встречаются на всех створах, среди наиболее часто встречаемых видов этого семейства — плотва, уклейка, голавль, елец обыкновенный, пескарь обыкновенный — на >50% створов. Также достаточно часто встречаются окунь (34% створов) и щука (35% створов). Представители семейств вьюновых, бычковых, головешковых, колюшковых, тресковых, игл-рыб встречаются на <15% створов. Реже всех встречаются вьюн, линь, налим.

Наибольшая средняя численность особей, характерная для карповых (уклейка, карась серебряный, голянь, рыбец), >20 тыс. шт/га. Уникальна в своем роде численность вида горчак из семейства карповых. При том что представители этого вида обнаружены только на двух створах на р. Урал (в районе сел Колпакского и Казачья Губерля), численность его там была максимальной — 72 тыс. шт/га.

Необходимо отметить, что ранее наличие горчача в ихтиофауне бассейна р. Урал не отмечалось другими авторами. Учитывая очень большой охват работ авторов настоящей статьи как по самой р. Урал, так и по ее основным притокам, можно сделать вывод о значительной специализации данного вида рыб к условиям обитания и образованию локальных групп, занимающих очень небольшие участки реки, но больших по численности. Поэтому вероятность встречи его была небольшой, что косвенно отмечено отсутствием горчача в летней экспедиции и нахождением его только в сентябре при увеличении количества створов на р. Урал.

При этом лидеры по численности — три вида карповых рыб: уклейка, рыбец и карась серебряный — на нескольких створах их численность превысила 200 тыс. шт/га. Максимальная численность уклейки зафиксирована на трех створах на р. Урал — п. Казачья Губерля, Краснохолм и Илек. Максимальная численность рыбца зафиксирована также в р. Урал в районе с. Нежинка.

На втором месте по максимальной численности — рыбец — не коренной вид в составе их-

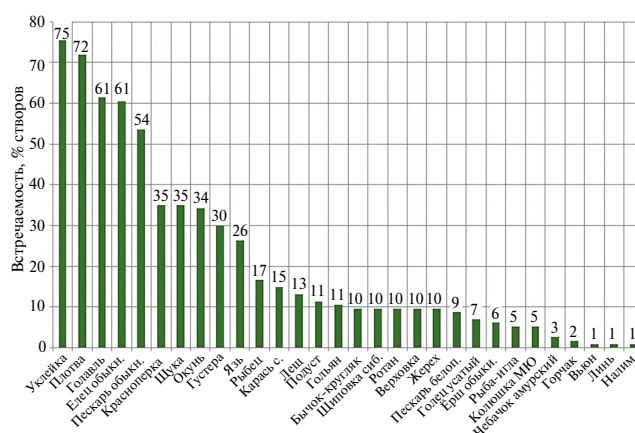


Рис. 2. Встречаемость видов ихтиофауны.

тиофауны бассейна р. Урал, он появился в нем относительно недавно. По опросам инспекторов рыбоохраны и рыбаков-любителей, рыбец в среднем течении р. Урал стал появляться в начале 2010-х гг., и с тех пор происходит непрерывный рост его численности на этом участке. Разноразмерные особи, включая производителей, встречаются здесь круглый год.

За период полевых исследований в 2022 г. было учтено 7 тыс. сеголеток и двухлеток рыбца. Его молодь отмечена на 19 участках: на 11 участках среднего течения р. Урал между устьями рек Илека и Ори, на уральских притоках р. Уртабуртя (1 локальность), р. Сакмаре (4), в бассейне последней на реках Салмыш (1) и Большой Ик (1), а также в пойменном озере у с. Алабайтал (1), соединяющемся с Уралом протокой.

В период исследований в 2022 г. обнаружены два новых вида для бассейна р. Урал — горчак и амурский чебаков. Если первый — скорее всего коренной вид, но обитающий на локальных участках р. Урал, то чебаков — типичный инвазионный вид, попавший в реки из прудовых хозяйств при завозе молоди из других регионов страны максимум в последние несколько лет. Распространение его пока точечное на нескольких участках в Оренбургской области.

Расселение другого инвазионного вида — ротана — произошло значительно раньше (50–60 лет назад), и он встречается во всех основных водоемах от самых верхних участков р. Урал до границы с Казахстаном. В реках его численность

Таблица 6. Количественные показатели ихтиофауны по водным объектам и створам отбора проб (экспедиции (Э): 1 – июльская, 2 – сентябрьская)

№	Э	Водоем	Участок	Численность, шт/га	Виды
р. Урал					
1	1	р. Урал	с. Рысаево	29000	8
2	2		с. Рысаево	126500	8
3	2		с. Ильтебаново	2900	6
4	2		г. Уральск	19400	6
5	1		г. Уральск – выше	131500	9
6	2		г. Уральск – ниже	2400	3
7	1		д. Москово	32067	4
8	1		г. Верхнеуральск	211667	9
9	2		г. Верхнеуральск	4500	4
10	2		п. Кожанов	11286	5
11	2		п. Приморский	110000	6
12	1		с. Верхнекизильское	23500	3
14	2		п. Сыртинский	68417	7
15	1		п. Увальский	10600	4
17	2		п. Грязнушинский	8267	5
18	1		п. Мусин	7125	5
19	1		п. Ириклинский	250	1
20	2		п. Уральск	243944	9
21	2		с. Колпакское	158750	11
22	1		г. Орск	171500	8
23	2		г. Орск	127600	10
24	1		г. Новотроицк	65250	8
25	2		с. Хабаровное	122037	12
26	2		с. Казачья Губерля	366320	6
27	2		п. Урал	101462	11
28	1		п. Урал	43063	8
29	2		с. Жанаталап	25154	7
30	2		с. Алабайтал	166143	13
31	2		п. Нежинка	358182	8
32	1		п. Нежинка	98519	14
33	1		г. Оренбург	152200	7
34	1		п. Черноречье	272667	7
35	2		п. Шуваловский	17900	11
36	1		с. Краснохолм	39000	6
37	2		с. Нижнеозерное	55600	9
38	2	ер. Старый Урал (р. Солёный)	с. Кардаилово	10571	5
39	1	р. Урал	с. Илек	325000	12
40	2		с. Илек	6300	10
41	2		с. Раннее	4400	5
		Среднее		95665	7
		Максимальное		366320	14
		Минимальное		250	1
р. Сакмара					
42	2	р. Сакмара	с. Ахметово	667	2
43	1		с. Сайгафар	22750	5
44	2		с. Сайгафар	4176	7

Таблица 6. Продолжение

№	Э	Водоем	Участок	Численность, шт/га	Виды
45	2		с. Абдулкаримово	14933	10
46	2		с. Янтышево	14267	6
47	1		с. Рамазаново	22000	6
47	2		с. Рамазаново	61706	8
48	2		г. Кувандык	161900	9
49	1		г. Кувандык	200600	8
50	1		с. Татарский Саракташ	100000	12
51	2		с. Федоровка-1я	123400	11
52	2		п. Сакмара	20250	9
53	2		г. Оренбург	20375	9
54	1		г. Оренбург	26250	3
		Среднее		56662	8
		Максимальное		200600	12
		Минимальное		667	2
Водохранилища р. Урал					
55	1	Верхнеуральское	п. Спасский	57500	6
56	1		п. Ивановский	14600	2
57	1		п. Приморский	40200	9
58	1	Магнитогорское	г. Магнитогорск	33500	5
60	1	Ириклинское	с. Уртазым	16417	11
61	1		п. Энергетик	27917	7
62	1		б/о Вишневые горки	20429	4
		Среднее		30080	6
		Максимальное		57500	11
		Минимальное		14600	2
р. Кандыбулак – приток р. Урал					
63	2	р. Кандыбулак	с. Базаргулово	12000	2
р. Миндяк – приток р. Урал					
64	2	р. Миндяк	с. Новобайрамгулово	12857	3
65	2	р. Большой Кизил	с. Тирмен	10200	5
66	2		с. Кизильское – выше	37231	7
67	1		с. Кизильское	61100	4
		Среднее		36177	5
		Максимальное		61100	7
		Минимальное		10200	4
р. Таналык – приток р. Урал					
70	1	р. Таналык	п. Бурибай	0	0
71	2		с. Новый Зирган	10867	8
72	1		с. Мамбетово	97500	10
		Среднее		36122	6
		Максимальное		97500	10
		Минимальное		0	0
р. Худолаз – приток р. Урал					
73	1	р. Худолаз	с. Калинино	83333	9
р. Большая Уртазымка					
74	1	р. Большая Уртазымка	с. Ургаза	81600	7
р. Джуса – приток р. Суундук					
76	1	р. Джуса	п. Слюдяной	40750	6
р. Большой Кумак – приток р. Урал					

Таблица 6. Продолжение

№	Э	Водоем	Участок	Численность, шт/га	Виды
77	1	Кумакское вдхр	п. Кумак	43000	6
78	1	р. Большой Кумак	п. Кумак	40000	3
79	1		п. Ударник	305333	4
		Среднее		129444	4
		Максимальное		305333	6
		Минимальное		40000	3
р. Орь – приток р. Урал					
80	1	р. Ушкота	п. Караганда	20667	8
81	2	р. Домбаровка	п. Голубой Факел	3000	4
84	2	р. Орь	п. Полевой	51455	6
86	2		с. Ащебутак	24308	10
87	2		п. Тукай	25800	7
88	1		г. Орск	137500	7
		Среднее		43788	7
		Максимальное		137500	10
		Минимальное		3000	4
р. Губерля – приток р. Урал					
90	2	р. Губерля	с. Узембаево	32333	9
92	2		с. Казачья Губерля	302000	8
93	2		с. Казачья Губерля	52400	6
		Среднее		128911	8
		Максимальное		302000	9
		Минимальное		32333	6
оз. Алабайтал – старица р. Урал					
94	2	оз. Алабайтал	с. Алабайтал	46200	10
р. Уртабуртя – приток р. Урал					
95	2	р. Уртабуртя	с. Жанаталап	27833	9
р. Бердянка – приток р. Урал					
96	2	р. Бердянка	с. Михайловка	33200	8
р. Донгуз – приток р. Урал					
97	2	р. Донгуз	п. Экспериментальный	61333	6
р. Илек – приток р. Урал					
98	1	р. Илек	п.Акоба	8550	8
99	2		п.Тамар-Уткуль	54000	8
100	1	р. Елшанка	г.Соль-Илецк	10800	4
101	1	р. Илек	с.Покровка	222667	4
102	2	р. Мазанка	с.Привольное	327000	7
103	2	р. Илек	с.Привольное	23308	11
104	1		с.Илек	45750	7
105	2		с.Илек	40500	9
		Среднее		91572	7
		Максимальное		327000	11
		Минимальное		8550	4
р. Чаган – приток р. Урал					
107	2	р. Чаган	п. Таловой	117200	9
р. Кураган – приток р. Урал					
109	1	р. Кураган	с. Рысаево	333	1
р. Салмыш – приток р. Сакмары					

Таблица 6. Окончание

№	Э	Водоем	Участок	Численность, шт/га	Виды
110	1	р. Большой Юшатырь	с. Октябрьское	19955	10
111	1	р. Салмыш	с. Жданово	99833	12
112	2		с. Жданово	5000	5
		Среднее		41596	9
		Максимальное		99833	12
		Минимальное		5000	5
р. Большой Ик – приток р. Сакмары					
113	2	р. Большой Ик	с. Туембетово	133067	7
114	2		с. Спасское	11000	6
		Среднее		72033	7
		Максимальное		133067	7
		Минимальное		11000	6

незначительна, а в пойменных озерах и старицах он может образовывать большие концентрации.

Количественные показатели молоди рыб по створам обследования представлены в табл. 6.

ВЫВОДЫ

В результате комплексного гидробиологического исследования водных объектов бассейна р. Урал удалось показать значительную неоднородность пространственного распределения различных характеристик основных групп гидробионтов: фито- и зоопланктона, бентоса и ихтиофауны.

Значительное влияние на развитие водных живых организмов оказывают зарегулированные участки рек (водохранилища и русловые пруды), изменяющие условия обитания гидробионтов и влияющие также на участки рек ниже плотин в результате выноса как самих планктонных организмов, так и загрязняющих веществ с биогенами, накопленными в водохранилищах.

В видовом составе фитопланктона исследованных водных объектов бассейна р. Урал обнаружено 447 таксонов микрофлоры, относящихся к восьми отделам. Численность фитопланктона водных объектов бассейна р. Урал колебалась от 84 до 536 540 тыс. кл/л, минимум отмечен в р. Урал – п. Нежинка, максимум – в оз. Алабайтал. При этом численность фитопланктона на притоках р. Урал была в диапазоне от 160 тыс. кл/л в р. Ушкоте до 204 868 тыс. кл/л в р. Таналык – г. Баймак, где отмечено “цветение”

синезеленых *Microcystis aeruginosa* Kütz. Диапазон биомассы водорослей в бассейне р. Урал – от 0.04 г/м³ до 27.88 г/м³. Основу структуры биомассы, как и численности, во многих створах формировали диатомовые водоросли, однако в реках Камсак, Донгуз, Бердянке, Салмыш, Илек, Иртек, Юшатырь, Чаган, Елшанке, Ушкоте и в некоторых створах р. Урал у больших поселков, таких как Илек, отмечено доминирование фитофлагеллят – чаще зеленых вольвоксовых водорослей и криптофитовых.

В видовом составе организмов зоопланктона в исследованных водных объектах бассейна р. Урал обнаружено 53 вида, относящихся к трем группам: *Rotatoria* – 23, *Cladocera* – 18, *Copepoda* – 12. В июле уровень развития зоопланктона был невысоким. По численности и биомассе преобладали веслоногие ракообразные: 1.01 тыс. экз/м³ и 19.12 мг/м³ соответственно. Коловратки и кладоцеры были представлены в меньших количествах. В сентябре численность коловраток и копепод осталась на том же уровне, численность кладоцер увеличилась в ~2 раза. Биомасса коловраток осталась практически такой же, как и в июле, биомасса кладоцер и копепод уменьшилась. В целом, уровень развития зоопланктона в период исследований невысокий, водоемы можно отнести к “малокормным”.

Количество видов зообентоса по водотокам летом колебалось в широких пределах – от 1 до 23. Наибольшая численность общего зообентоса (72080 экз/м²) отмечена в створе р. Таналык в месте локального скопления личинок хирономид преимущественно видов *Sindiamesa*

nivosa и *Chironomus plumosus*. Максимальные показатели биомассы бентосных организмов отмечены на одном из исследованных участков р. Урал (1807 г/м²) в основном за счет крупных моллюсков *Unio pictorum* и *Anodonta piscinalis*. Минимальные численность и биомасса бентофауны зафиксированы в р. Бляве (32 экз/м² и 0.048 г/м²). Осенью пределы колебаний количества видов зообентоса по водотокам составляли 3–34. Биомасса донной фауны наибольшая на створах р. Урал – с. Ильтебаново (1370 г/м²) и р. Илек – с. Илек (1907 г/м²). Наиболее высокой численностью (19 тыс. экз/м²) характеризовался участок р. Урал возле г. Орска. Самые низкие количественные показатели по водотокам отмечены в р. Сакмаре в районе г. Оренбурга (64 экз/м² и 0.096 г/м²) – исключительно по экологически пластичным видам, типичным пеллофилам – личинкам хирономид и олигохет.

В общей сложности в 2022 г. было обнаружено 30 видов ихтиофауны, относящихся к девяти семействам. Численность молоди рыб по разным участкам рек меняется в значительных пределах. Приоритетные по численности – три вида карповых рыб: уклейка, рыбец и карась серебряный. Второй по максимальной численности рыбец – не коренной вид в составе ихтиофауны бассейна р. Урал и появился в нем всего полтора десятка лет назад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехина Г.П., Мисетов И.А., Верхошенцева Ю.П. Сезонная динамика в структуре альго-бактериопланктона среднего течения реки Урал в районе города Оренбурга // Матер. Всерос. научно-практ. конф., посвящ. 275-летию Оренбург. губернии и 85-летию Оренбург. обл. “Оренбургские горизонты: прошлое, настоящее, будущее”. Оренбург, 2019. С. 285–288.
2. Вода России. Речные бассейны. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2000. 536 с.
3. Гареев А.М., Фатхутдинова Р.Ш. Основные этапы изучения гидролого-экологических характеристик водотоков в бассейне реки Урал (в пределах Российской Федерации) // Вод. хоз-во России. 2017. № 5. С. 4–15.
4. Джаяни Е.А. Фитопланктон проточного и зарегулированного участков р. Урал в разные сезоны // Поволжский экол. журн. 2020. № 1. С. 31–43.
5. Драбкин Б.С., Олифсон Л.Е., Баранов Л.Е. Гидробиология реки Урала. Оренб. обл. организация Всерос. о-ва охраны природы. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1971. 103 с.
6. Мумбаева С.С., Килякова Ю.В., Мирошникова Е.П., Аринжанов А.Е. Гидробиологическая характеристика реки Урал // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Сб. материалов Всерос. науч.-метод. конф. Оренбург, 2022. С. 3524–3527.

HYDROBIOLOGICAL CHARACTERISTIC OF DIFFERENT PARTS OF THE URAL RIVER BASIN IN THE RUSSIAN FEDERATION TERRITORY

S. V. Yakovlev^{a, *}, V. O. Polyanin^a, V. S. Boldyrev^b, T. B. Golokolenova^b, Yu. V. Bas'ko^b,
L.A. Cheresheva^b

^aWater Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

^bVolgograd Branch, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Volgograd, 400001 Russia

*e-mail: Jack_sv@mail.ru

Over the entire period of studies in the water bodies in the Ural River basin, comprehensive hydrobiological studies have not been carried out in many areas both on the main watercourses of the Ural and Sakmara rivers and on a large number of tributaries of different levels. The results of such studies carried out by the Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, during expeditions in the summer and autumn 2022 are discussed. A large body of data on phytoplankton, zooplankton, zoobenthos, and juvenile fish was collected and processed.

Keywords: water bodies in the Ural River basin, monitoring, hydrobiology, phytoplankton, zooplankton, zoobenthos, ichthyofauna, hydrobiology.