

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 сработки Верхнеуральского и Ириклинского водохранилищ показал, что средний объем сработки 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

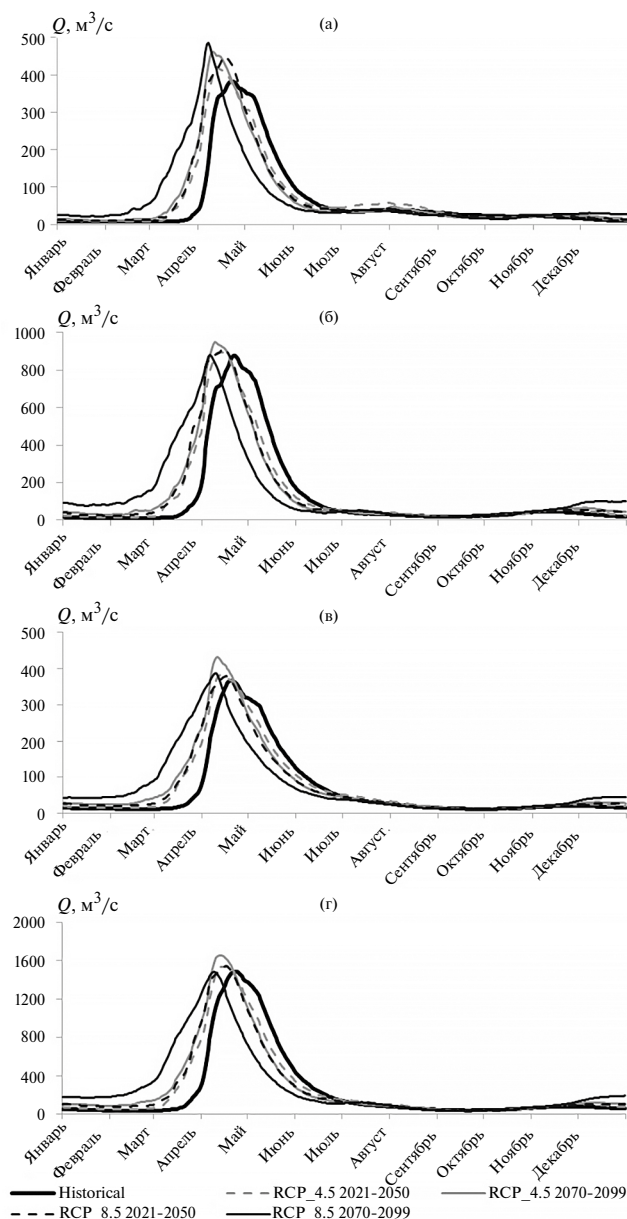


Рис. 2. Приток воды в Ириклинское водохранилище (а), сток р. Сакмары (б) и р. Урал у г. Оренбурга (в) и в приграничном створе ниже впадения р. Илек (г) в среднем за 2021–2050 и 2070–2099 гг. согласно RCP 4.5 и RCP 8.5 и 1976–2005 гг. (“historical”).

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 $15 \text{ м}^3/\text{с}$.

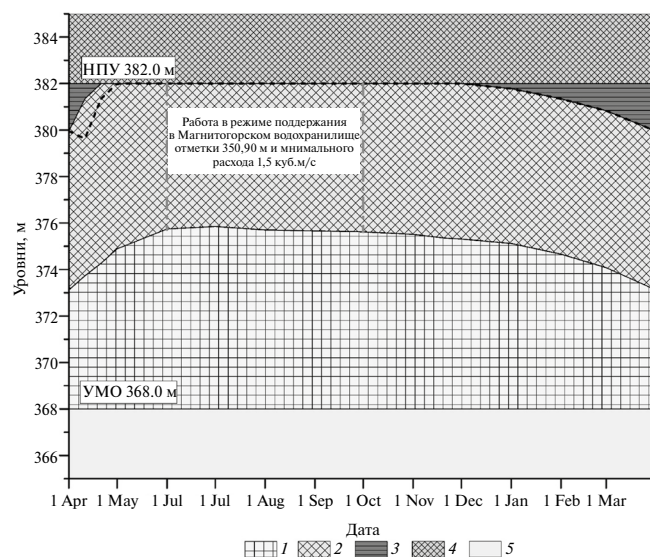


Рис. 3. Проект диспетчерского графика Верхнеуральского водохранилища. 1 – зона неиспользуемого объема; 2 – зона сниженной отдачи: $1.9 \text{ м}^3/\text{с}$ IV–X, $3 \text{ м}^3/\text{с}$ XI–III; 3 – зона гарантированной отдачи $7 \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – зона повышенной отдачи $30 \text{ м}^3/\text{с}$;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

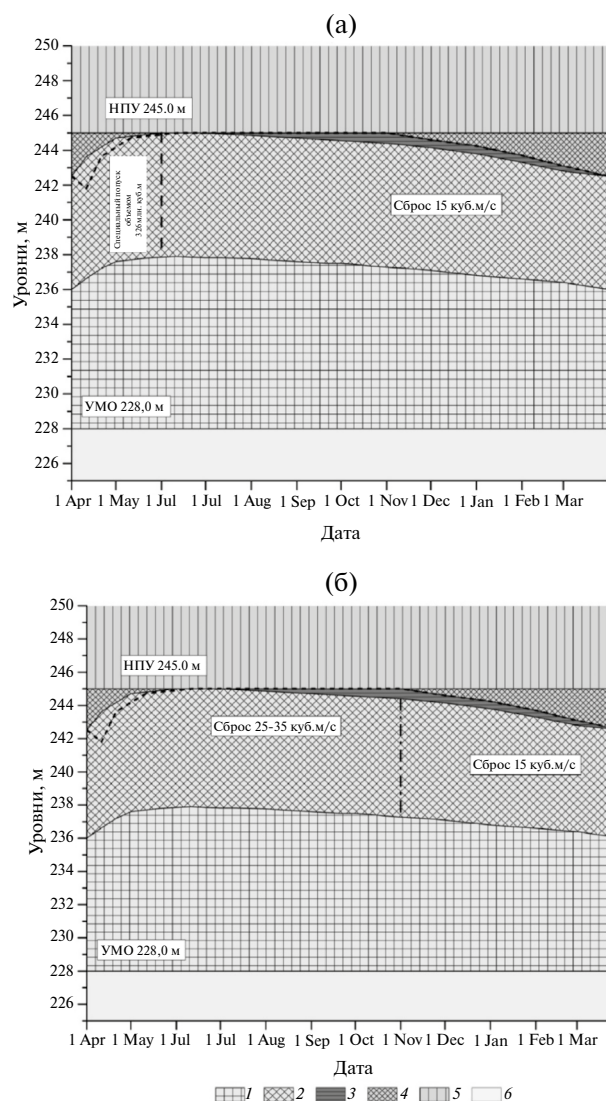


Рис. 4. Варианты диспетчерского графика Ириклинского водохранилища: а – осуществление спецпопуска объемом 326 млн м^3 ; б – с апреля по октябрь расход $25\text{--}35 \text{ м}^3/\text{с}$, зоны: 1 – неиспользуемого объема; 2 – сниженной отдачи $15 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – гарантированной отдачи $22.9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

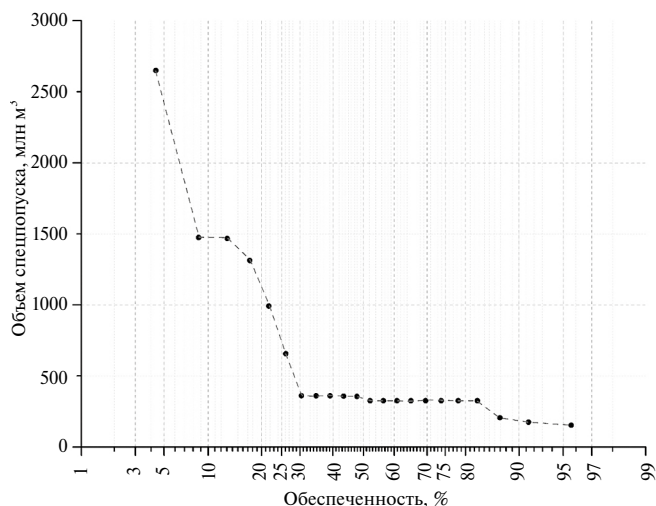


Рис. 5. Обеспеченность объемов спецпопуска из Ириклинского водохранилища.

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 $19.5 \text{ м}^3/\text{с}$ (в действующих ПИВР) до $22.9 \text{ м}^3/\text{с}$, что позволяет с апреля по октябрь бесперебойно давать в нижний бьеф расходы $25\text{--}35 \text{ м}^3/\text{с}$ при попуске в зимний период в размере минимально допустимого расхода $15 \text{ м}^3/\text{с}$. Дополнительные водные ресурсы Ириклинского водохранилища могут быть использованы для осуществления специального попуска объемом 326 млн м^3 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 $46.5 \text{ м}^3/\text{с}$ за период 2021–2050 гг. и $41.5 \text{ м}^3/\text{с}$ за период 2070–2099 гг. Для сценария RCP 8.5 отдача может составить 48 и $46.7 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. За счет увеличения гарантированной отдачи попуски из Ириклинского водохранилища в летне-осенний период могут быть увеличены до $40\text{--}55 \text{ м}^3/\text{с}$, минимальный сбросной расход может быть увеличен до $30 \text{ м}^3/\text{с}$. 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., Какутина 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. Беднарчук 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.