

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.555.001.572

М.Г. Гречушникова¹, Н.Г. Пуклакова², К.К. Эдельштейн³ВОЗМОЖНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА⁴

Приведены результаты расчета изменения гидрологических характеристик Цимлянского водохранилища в случае прогнозируемого потепления (изменение проточности, ледотермического режима, минерализации воды, стратификации водной толщи) при реализации наиболее неблагоприятного для водоснабжения и водопользования сценария при уменьшении слоя годового стока и слоя стока за половодье.

Ключевые слова: водохранилище, речной сток, климатические изменения, гидрологический режим.

Введение. Наблюдаемое в конце XX в. потепление климата по многочисленным прогнозам усилится в текущем столетии, в связи с чем коллективами различных институтов выполнены прогностические оценки ожидаемой реакции водных экосистем некоторых водоемов на ожидаемое потепление [19, 22, 25]. Модели потепления климата в XXI в. [13] базируются на гипотезе усиления оранжерейного эффекта в структуре теплового баланса Земли вследствие ожидаемого увеличения в атмосфере концентрации водяного пара и парниковых газов. Наряду с этим прогностическим направлением в последние годы появились научные работы, в которых рассматривается вероятность не потепления, а, наоборот, похолодания климата и даже наступления очередного малого ледникового периода. Сомнение в вероятности существенного глобального потепления выдвинуты в работе [9], а в работе [15] утверждается, что похолодания в ледниковый период голоцена вызывали увеличение содержания CO₂ в атмосфере в 4 раза, а не наоборот. Причиной же роста глобальной температуры к 1990 г. считают увеличение солнечной активности, которая снизилась к 2020 г., как это наблюдалось в 1940—1970-е гг. По сходному мнению заведующего сектором космических исследований Пулковской обсерватории Х. Абдусаматова [27], в 2014 г. начнется новый малый ледниковый период, подобный похолоданиям, зафиксированным в XIII, XV, XVII и XIX вв. Однако эти гипотезы еще не получили количественных оценок в форме климатических моделей, которые могли бы послужить базой прогностических расчетов измене-

ний речного стока и соответственно изменений гидрологического и экологического состояния водохранилищ. Кроме того, по-видимому, похолодание не приведет к неожиданным изменениям в режиме стока и его регулирования. Мы рассматриваем только вероятность изменений в случае реализации прогностических расчетов значительного климатического потепления, поскольку связанное с ним сокращение стока для юга европейской территории России (ЕТР) неблагоприятно для многих отраслей хозяйства.

Постановка проблемы. Цель работы — оценить вероятные изменения гидрологического режима Цимлянского водохранилища (головного в Донском каскаде) при реализации неблагоприятного прогноза изменения стока на юге ЕТР. Задача первого этапа работы — проведение диагностических расчетов внутрigoдового режима уровня и водообмена, ледовотермического режима и минерализации воды по данным гидрометеорологических наблюдений, а второго этапа — прогностические расчеты тех же характеристик гидрологического режима водоема с учетом изменения условий формирования стока на водосборах Дона и других притоков водоема, чтобы выявить возможные неблагоприятные последствия потепления для крупнейшего водохозяйственного комплекса на юго-западе России.

Материалы и методы исследований. В основу нашей работы положен выполненный на географическом факультете МГУ цикл прогностических исследований изменения климатических, гидротермических и водных ресурсов в случае дальнейшего потепления

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: allavis@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, проф., докт. геогр. н.; *e-mail*: emek05@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. с.; *e-mail*: puklakov@mail.ru

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00137).

в XXI в. на Восточно-Европейской равнине [11, 24]. Исходными данными для оценки возможного при этом изменения речного стока послужили результаты моделирования климата для сценария IPCC A2 (наиболее «жесткого» варианта) [10]. Разработана и верифицирована универсальная квазидвумерная боксовая гидрологическая модель водохранилища (ГМВ—МГУ) [17, 18, 23]. Она уже многократно использована нами для диагностических расчетов водного, теплового, солевого балансов и режима техногенных водоемов разных размеров и проточности. Рассчитаны по ней среднесуточными значениями характеристик воспроизводится синоптическая изменчивость гидрологического режима отдельных районов и участков Рыбинского, Ивановского, Можайского, Истринского. По этой модели выполнены и прогностические расчеты возможного изменения характеристик режима этих же водохранилищ при климатических изменениях погоды [6—8]. Количественная оценка отдельных составляющих водного и теплового баланса, колебаний уровня и проточности, характеристик температурного режима в жаркие и маловодные годы необходима для последующих расчетов химико-биотических показателей качества воды при ожидаемых климатических изменениях.

Многовариантные прогностические расчеты гидрологического режима. Объект моделирования — морфологически сложное долинное Цимлянское водохранилище (рис. 1, а), расположенное в нижней части бассейна р. Дон. Оно заполнено водой в 1952—1953 гг. и создавалось как составная часть Волго-Донского водного пути. Теперь водохранилище имеет многоцелевое назначение — осуществляет многолетнее регулирование стока Дона, обеспечивает весенний рыбохозяйственный и навигационный попуски для обеспечения необходимых экологических и судоходных условий на нижележащем участке реки, используется для получения электроэнергии на приплотинной ГЭС и Ростовской АЭС. В Волгодонске берет начало Донской магистральный канал (ДМК), построенный одновременно с Цимлянской ГЭС, с объемом водозабора более 1500 млн м³ в сезон. По ДМК вода самотеком поступает в долину р. Сал, где распределяется по системе вторичных каналов и разбирается на орошение. Водная масса водохранилища используется и другими, меньшими системами орошения — Генераловской с 1959 г. (50—60 млн м³) и Хорошевской с 1963 г. (3 млн м³ в сезон) [2]. Водохранилище соединено с Волгой Волго-Донским каналом. Его обводнение производится из Цимлянского и небольшого Веселовского водохранилищ.

Цимлянское водохранилище многолетнего регулирования стока со средним значением коэффициента водообмена 0,8 год⁻¹. Актуальность исследования возможного изменения режима водохранилища заключается в том, что территория бассейна Дона слабо обеспечена водными ресурсами. Речной сток формируется преимущественно за счет весеннего сне-

готаяния, поэтому характеризуется большой изменчивостью обычно непродолжительного и высокого половодья, от которого зависят значительные межгодовые колебания объема стока. Из-за гидрологических особенностей стока необходимо его глубокое многолетнее и сезонное регулирование, так как в водохозяйственном комплексе приоритет имеет водоснабжение населенных пунктов и массивов, орошаемых ДМК. Гидроэнергетика имеет подчиненную роль, так как затраты воды на энергетические цели не предусмотрены. Минимальный санитарный попуск в нижний бьеф гидроузла принят равным 100 м³/с.

Методика моделирования. Для расчета притока воды с водосбора водохранилища необходимо знать значения среднесуточного расхода воды, ее температуры и минерализации в приустьевых створах притоков и иметь данные о площадях водосбора бокового водосбора отсеков, на которых нет гидрометрических наблюдений, а также расход сброса воды в нижний бьеф и забора воды из водохранилища в каналы. В модели ГМВ—МГУ, имеющей суточный расчетный шаг, Цимлянское водохранилище представлено 8-ю расчетными отсеками, 5 из которых — в главной долине (рис. 1, б) и 3 — в приустьевых заливах притоков. Каждый отсек состоит из боксов — слоев метровой толщины, водная масса в каждом из них принята однородной. Общее число боксов при заполненном водохранилище до НПУ равно 140.

Расчет основан на вычислении суточного водного баланса всего водоема, а затем на последовательном вычислении водного, солевого и теплового баланса каждого бокса во всей последовательности отсеков с учетом процессов внешнего и внутриводоемного водо-, тепло- и солеобмена, а также плотностной устойчивости водной толщи, если она стратифицирована. В модельных расчетах использованы координаты батиметрических кривых отсеков Цимлянского водохранилища, вычисленные по материалам морфометрических работ, которые выполнены Инженерным центром ЕЭС в 2005 г. [21]. Для тестовых расчетов выбраны маловодные 1972 и 1973 гг. с полным набором необходимой для моделирования гидрометеорологической информации. В тестовых расчетах гидрологического режима водохранилища использованы среднесуточные значения метеорологических характеристик — температуры воздуха, упругости водяного пара, облачности общей и нижней, скорости ветра, а также величин ежесуточного поступления солнечной радиации и осадков по наблюдениям на метеостанциях Волгограда (для отсеков I-1, I-2 и II-1), для остальных отсеков — пост Котельниково (рис. 1, а).

Среднесуточные значения уровня воды в водохранилище и расход сброса воды в нижний бьеф задавали по данным в/п Цимлянской ГЭС из ежегодников [3—5] в предположении, что сброс проводился через глубинный водозабор ГЭС. Расход притока воды с водосборов (со створов гидрометрических наблюдений) задавали по данным [3—5]. Среднесуточные значения

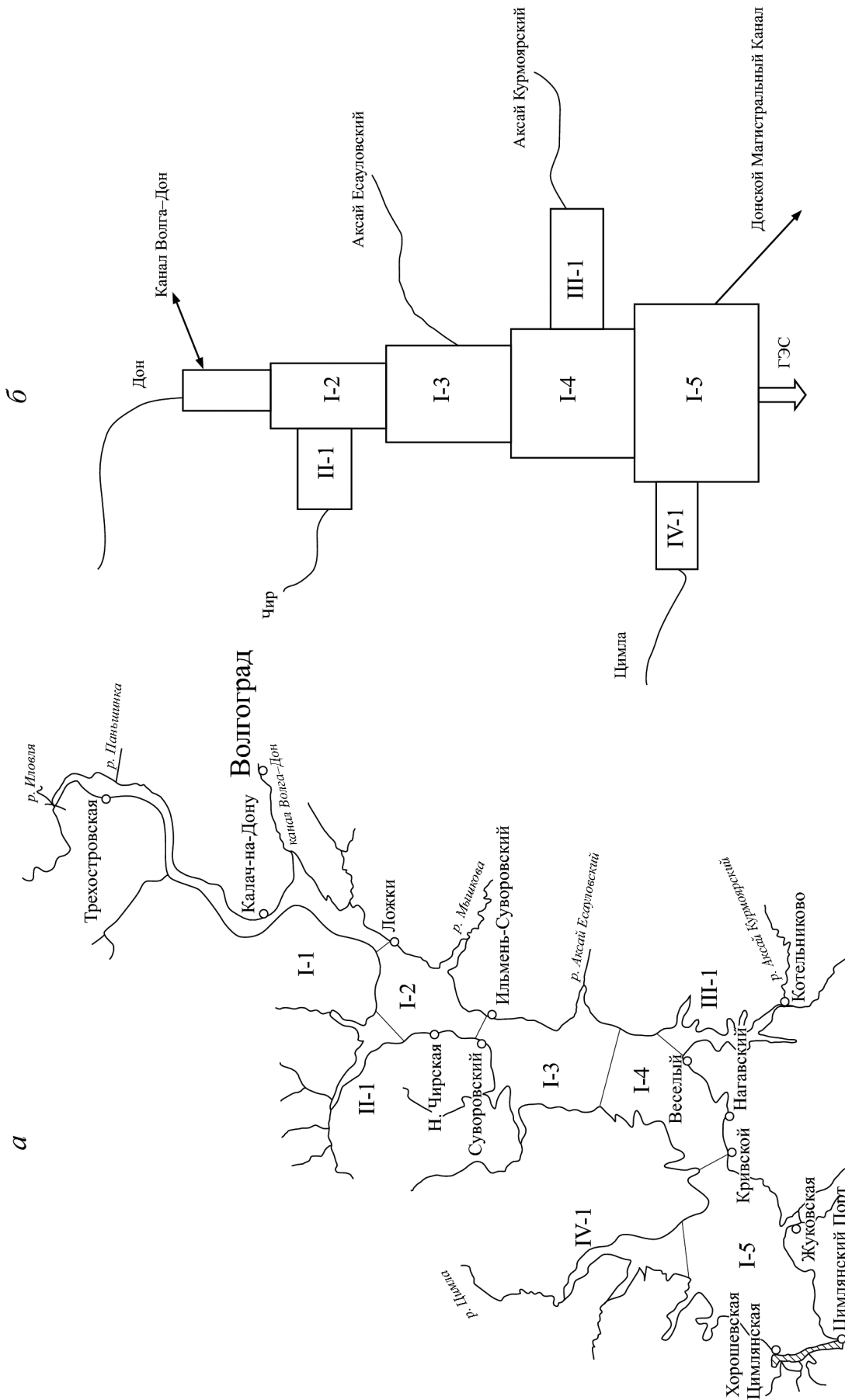


Рис. 1. Цимлянское водохранилище (а) и структура его модели (б). Цифрами обозначены расчетные отсеки

температуры воды притока для вегетационного периода определяли по среднедекадным данным водомерных постов из указанных ежегодников, но с поправкой на внутридекадные колебания [6] (для зимнего периода они приняты равными $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Минерализация речной воды зимой в притоках составляла от 380 до 500 мг/л, в безледный период принималась по рассчитанным уравнениям связи ее значений с величиной расхода воды в реке. Интенсивность суммарной солнечной радиации задана по среднемесячным значениям в соответствии с данными, приведенными в [14], а ее ежесуточные значения рассчитывали сплайн-интерполяцией с использованием многочленов 2-го порядка и учетом облачности.

Для статистической оценки результата тестовых модельных расчетов (валидации) использованы среднедекадные величины температуры поверхности воды T_0 , из ежегодников по водпостам Ложки (отсек I-1), Нижний Чир (отсек I-2), Суворовский (отсек I-3), Красноярский (отсек I-4), а также среднее значение по постам Кривской и Цимлянск (отсек I-5) (рис. 1). Начальным днем этих расчетов принято 1 января. Данные табл. 1 показывают, что для всего расчетного периода качество модельного расчета T_0 хорошее, так как наибольшая погрешность S составила $1,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $S/\sigma = 0,21$ наиболее обширном отсеке I-3. Следовательно, модельный расчет хорошо воспроизводит годовой термодинамический цикл во всех отсеках водохранилища. Некоторое завышение значений T_0 в отсеках I-1, I-3 и I-4, возможно, вызвано тем, что метеостанции в Волгограде и Котельниково удалены от водохранилища на 60 и 25 км соответственно. За 1973 г. в [5] приведены данные о вертикальном распределении температуры воды на трех гидрологических станциях в разные сезоны. Сравнение с рассчитанными значениями температуры воды показало, что качество воспроизведения внутригодового вертикального распределения температуры воды по критерию S/σ хорошее, но и в этом случае завышение до $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ проявляется в наиболее протяженном отсеке I-1 и в отсе-

ке I-3, в которых данные единичных станций наблюдения наименее репрезентативны для оценки среднесуточных значений температуры во всем объеме таких участков.

Использованные данные. Для прогностического расчета предполагаемого климатического изменения структуры водного баланса Цимлянского водохранилища и внутригодовых колебаний уровня воды в нем использованы оценки вероятного изменения формирования стока, полученные М.В. Сидоровой [20] и вошедшие в монографию [24]. Согласно этому прогнозу по модельному ансамблю МОЦАО для центра Восточно-Европейской равнины, ожидается существенное снижение слоя стока южнее $54\text{--}55^{\circ}$ с.ш., причем тенденция к снижению стока на юге равнины в конце XXI в. будет усиливаться. В соответствии с картами стока М.В. Сидоровой, представленного в виде изолиний модульного коэффициента, пределы 90%-го доверительного интервала могут составить за половодье $0,4\text{--}0,9$ (нижний—верхний предел). Снижение слоя стока воды за половодье при почти неизменном годовом стоке означает увеличение паводкового стока в летне-осенний сезон на $10\text{--}60\%$. Для расчета возможного изменения гидрологического режима Цимлянского водохранилища в качестве базового года выбран маловодный 1973 г. Значения модульного коэффициента стока с территории водосбора этого водохранилища по гидрологическому прогнозу составят зимой $0,9$; весной $0,5$; летом $0,8$; осенью $0,6$; в среднем за год $0,7$ по отношению к среднему многолетнему объему воды за эти же сезоны. Входные файлы для моделирования вероятных климатических изменений подготовлены по методике, изложенной в статье [6], но с небольшими отличиями, обусловленными полизональностью водосбора Дона, — значения модульного коэффициента (K_M) нижнего и верхнего пределов 90%-го доверительного интервала вероятного изменения слоя годового стока к середине и концу XXI в. и слоя стока воды за половодье (табл. 2) приняты как средневзвешенные по территории водосбора.

Таблица 1

Статистическая оценка качества тестового расчета среднедекадных значений температуры поверхности воды в безледные периоды

Статистические оценки валидации	Расчетные отсеки модели Цимлянского водохранилища									
	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5
	1972 г., $n = 26$					1973 г., $n = 26$				
Δ	-0,1	1,1	-0,7	-0,6	0,2	-0,5	-0,1	-1,5	-1,1	-1,1
S	0,9	1,7	1,8	1,3	1,0	1,4	0,9	2,3	1,9	1,3
σ	8,7	9,1	8,8	8,0	8,1	7,4	7,8	7,3	11,9	8,3
S/σ	0,10	0,19	0,21	0,16	0,13	0,20	0,12	0,32	0,16	0,16

Примечания. $\Delta = \Sigma(T_{\text{он}} - T_{\text{ор}})/n$ — средняя ошибка, $^{\circ}\text{C}$; $S = [\Sigma(T_{\text{он}} - T_{\text{ор}})^2/(n-1)]^{0,5}$ — среднеквадратическая погрешность; $\sigma = [\Sigma(T_{\text{он}} - T_{\text{он ср}})^2/(n-1)]^{0,5}$ — среднеквадратическое отклонение ряда в n пар значений наблюдаемых $T_{\text{он}}$ и $T_{\text{ор}}$, S/σ — критерий валидации.

Поскольку Цимлянское водохранилище имеет многоцелевое назначение, в прогностических расчетах нами уменьшены опубликованные в [3—5] значения расхода воды, сбрасываемой через ГЭС и подаваемой в каналы Волго-Дон и ДМК, пропорционально сокращению притока воды с водосбора. Водозаборы прочих потребителей и других оросительных систем не учитывались, так как, по данным [3], объем их перекачки много меньше, чем в ДМК.

Т а б л и ц а 2

Ожидаемое относительное изменение стока с водосбора Цимлянского водохранилища в XXI в. и редуциционный коэффициент (K_p) при оценке наиболее вероятного изменения главного расходного компонента водного баланса водоема

Время	Нижний—верхний предел 90%-го доверительного интервала коэффициентов		
	K_M годового стока	K_M стока половодья	K_p годового сброса воды
К середине XXI в.	0,56—0,74	0,3—0,67	0,43—0,72
К концу XXI в.	0,29—0,63	0,18—0,46	0,25—0,56

Фильтрационные потери воды включены в сброс и сокращены пропорционально величине среднегодового редуциционного коэффициента K_p (табл. 2). При прогностических расчетах невозможно соблюдать требования к гарантированной водоотдаче и санитарному попуску из-за того, что при существенном сокращении притока воды к водохранилищу, несомненно, потребуется пересмотр водохозяйственных нормативов.

В качестве метеорологического форсинга использованы прогностические данные, полученные по модели INMCM4 (Institute of Numerical Mathematics Climate Model vers. 4), разработанной в Институте вычислительной математики РАН [28]. Это данные численных экспериментов по прогнозу климата на 2006—2010 гг., подготовленных по сценариям МГЭИК (Международная группа экспертов по изменению климата) в рамках проекта СМIP5 [26]. Для гидрологического моделирования мы использовали данные для сценария RCP8.5 (наибольшее потепление климата к концу XXI в.) для ближайшего узла сетки с координатами 47° с.ш., 42° в.д. (60 км на юг от гидроузла). Модельный расчет должен воспроизводить не осредненные за много лет сезонные колебания, а внутригодовую изменчивость гидрологических характеристик, соответствующую обычным для региона сменам синоптических условий в тот или иной год.

Данные для конкретного года необходимо преобразовать, поскольку к реализации рядов метеорологических характеристик привязаны ряды гидрологических характеристик притока воды, поэтому файл исходных метеоданных подготовлен следующим образом. По данным наблюдений в 1973 г. (этот год выбран исходя из полноты комплекса данных для диагностического и прогностического расчета) выделены периоды ледостава и открытой воды. Для каждого из них определены средние значения метеохарактеристик. Затем для ряда температуры воздуха (T), например, и модельного осредненного климатического ряда (T^*) рассчитаны значения ежесуточного редуциционного коэффициента k_i для введения поправки к наблюдаемым среднесуточным значениям $T_i^* = k_i T_i$. Таким же способом редуцированы ряды количества осадков, скорости ветра, температуры и влажности

воздуха, атмосферного давления. В итоге полученная сумма количества осадков и средние значения других величин приведены к характерным прогностическим значениям, которые рассчитаны по климатической модели INM RAS. Полученные трансформированные ряды метеохарактеристик использованы для расчета изменений гидрологического режима по сравнению с диагностическим вариантом для 1973 г. (сценарий А) для вариантов прогностического сокращения притока воды в водохранилище на середину XXI в. (сценарий Б) и на конец XXI в. (сценарий В). Расчеты проведены по двум вариантам — по нижнему и верхнему доверительным интервалам значений редуциционного коэффициента притока воды, т.е. наименьшее и наибольшее сокращения притока (Б1, Б2, В1, В2 соответственно).

Результаты исследований и их обсуждение. Выполненные по модели ГМВ—МГУ многовариантные расчеты составляющих водного баланса Цимлянского водохранилища, в которых использованы данные о прогнозируемом притоке воды в него, водо- и теплообмене с атмосферой и ложем, а также принятые допущения по расходованию его водных ресурсов дают представление о возможной изменчивости гидрологического режима в маловодные годы в середине и в конце текущего столетия (рис. 2, табл. 3). В табл. 3 показаны вероятные значения важнейших характеристик уровня режима и коэффициента проточности по сценариям модельных расчетов с оптимистичными (Б1 и В1) и неблагоприятными (Б2 и В2) прогнозами сокращения притока воды в водохранилище и с неизбежным дефицитом водных ресурсов для водного хозяйства Нижнего Дона.

В случае сокращения притока воды в водоем и ее расхода примерно в 2 раза проточность водохранилища уменьшится в 1,5 раза (варианты Б2 и В1). Если же приток снизится в 4 раза, то проточность замедлится в 3,5 раза (вариант В2). В случае неблагоприятного потепления климата (сценарий Б2) расход воды в нижний бьеф, растянутый с апреля по конец июня, для затопления нерестилищ в устьевой области Дона придется уменьшить в 2 раза (рис. 2, б), что приведет к снижению уровня воды в водохранилище на 0,5—1 м ниже отметки уровня минимального объема (УМО), а это неблагоприятно для работы ГЭС в течение всей осени и зимы (рис. 2, в). Эти проблемы обострятся еще сильнее при продолжении потепления климата до конца века (сценарий В2). За период наблюдений, для которого есть опубликованные данные, самым маловодным был 1972 г. с объемом притока 7,99 км³, суммарным сбросом ГЭС 7,2 км³, водозабором в каналы Волго-Дон и ДМК около 0,5 и 1,5 км³ соответственно. При сравнении этих значений с данными табл. 3 видно, что уменьшение стока, аналогичное сценарию Б1, наблюдалось в XX в. Однако такие годы опасны с точки зрения водообеспечения, если они образуют серии столь же маловодных лет, когда уровень воды в начале года становится

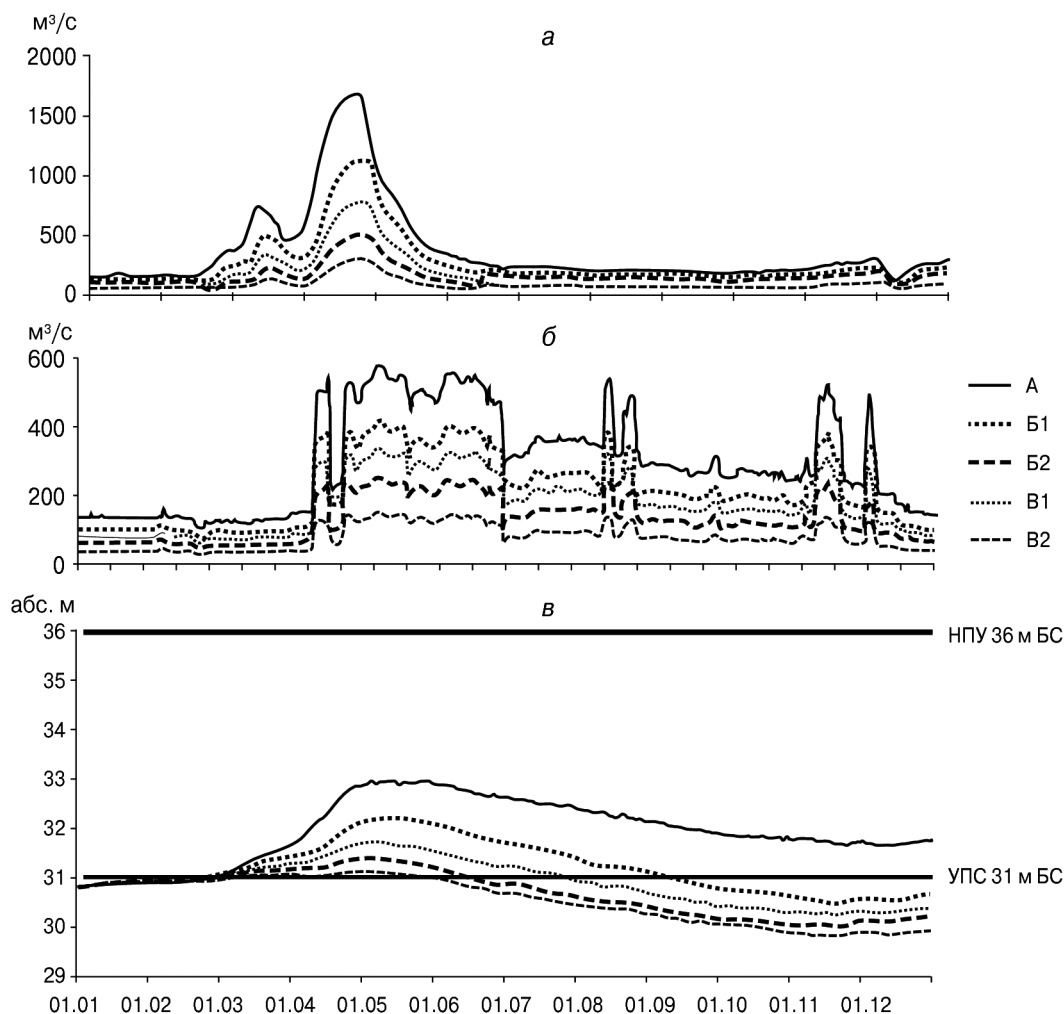


Рис. 2. Изменение суммарного притока (а) и суммарного сброса воды, включая водозабор (б), и уровня воды (в) в разных вариантах модельных расчетов

Таблица 3

Изменение главных составляющих годового водного баланса Цимлянского водохранилища и характеристик его уровня режима по сценарным расчетам

Составляющие водного баланса и интенсивность водообмена	Варианты диагностического и прогностических расчетов				
	А (1973)	Б1—Б2 в середине века		В1—В2 в конце века	
Приток, км ³	11,79	8,55—5,11		6,67—2,91	
Сброс воды ГЭС, км ³	7,45	5,36	3,20	4,32	1,86
В канал Волга—Дон, км ³	0,36	0,26	0,15	0,20	0,09
Водозабор в ДМК, км ³	1,49	1,07	0,64	0,85	0,37
Коэффициент $K_{в}$, год ⁻¹	0,86	0,62	0,37	0,54	0,25
Уровень, абс. м (отметки НПУ = 36 абс. м и УПС = 31 абс. м)					
В начале года	30,81	30,81	30,81	30,81	30,81
В конце года	31,74	30,63	30,22	30,39	29,92
Минимальный за год	31,64	30,51	30,04	30,24	29,83
Максимальный за год	32,97	32,19	31,37	31,71	31,12

Примечания. А — по данным гидрометеорологических наблюдений 1973 г.; Б1 и Б2 — в середине XXI в. по прогнозу сокращения притока для верхнего и нижнего пределов 90%-го доверительного интервала; В1 и В2 — для аналогичных пределов вероятного интервала притока в конце XXI в.

с каждым годом все ниже относительно минимально допустимого уровня предпаводочной сработки (31 м абс.).

При одинаковых начальных условиях результаты расчетов показывают существенные различия гидрологического режима водохранилища начиная с февраля. В вариантах расчета Б и В ледовый покров стаивает к концу первой декады февраля, т.е. на месяц раньше, чем в варианте А (рис. 3). За период открытой воды в этих вариантах водная масса аккумулирует больше тепла, медленнее остывает. В результате это приводит к тому, что ледовый покров не образуется, хотя в базовом варианте А (1973) он формируется в верховьях в начале декабря, а у плотины — в конце его первой декады (диагностический расчет хорошо согласуется

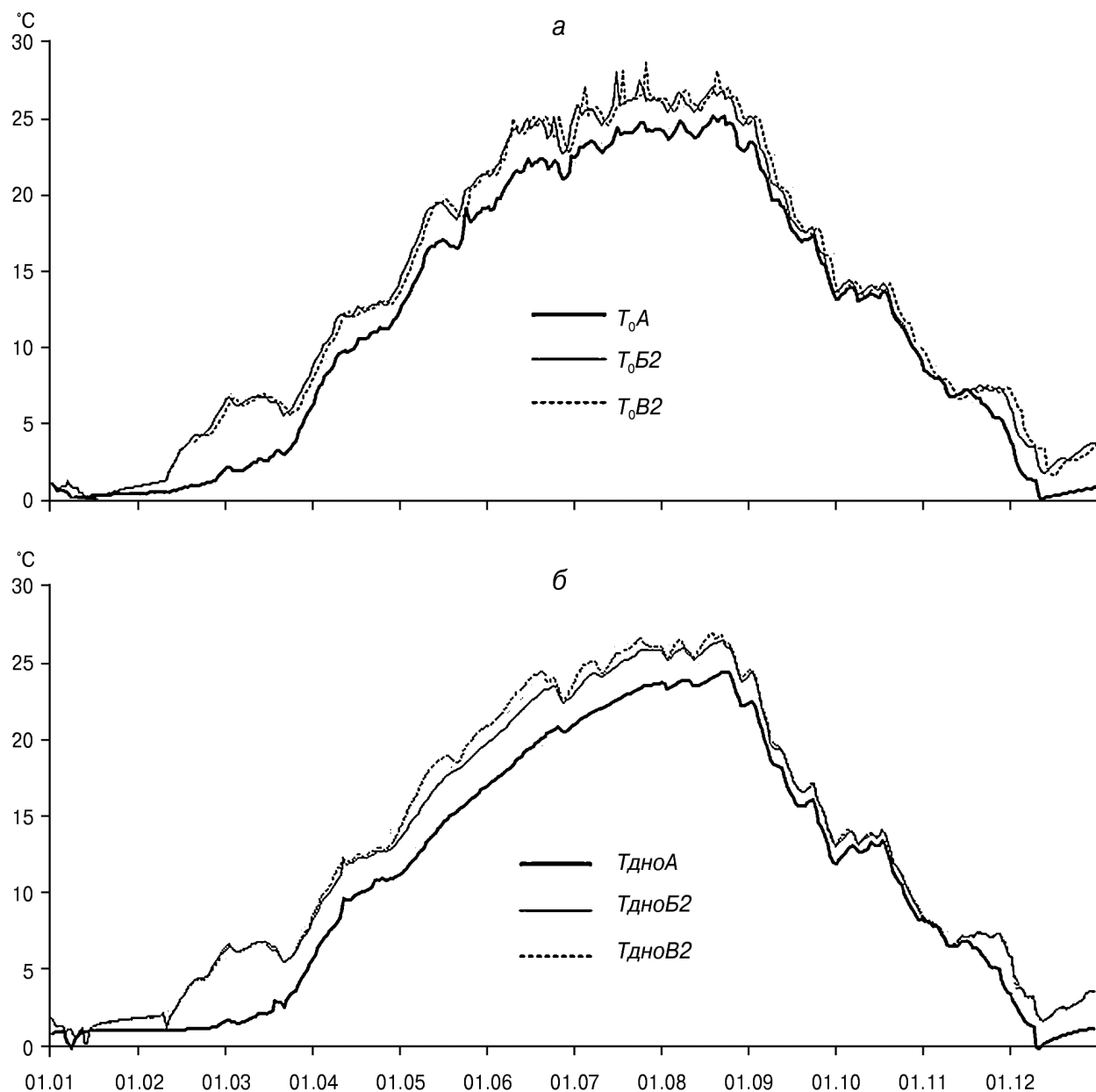


Рис. 3. Изменение температуры поверхностного (а) и придонного (б) слоя воды в отсеке I-5 и продолжительность ледостава в разных вариантах расчета

с данными водомерных наблюдений). Таким образом, во всех прогностических сценариях возможно сокращение длительности ледостава вплоть до его отсутствия. Раннее вскрытие (или практически полное отсутствие ледостава) обуславливает равномерное по вертикали распределение температуры воды и минерализации с середины февраля, а в 1973 г. обратная стратификация при ледоставе сохранялась до середины марта в верховьях и до конца марта у плотины. Уже к началу февраля заметны отличия в минерализации воды по диагностическому и сценарным расчетам в верховьях (до 20 мг/л для вариантов Б1, Б2 и В1 и до 40 мг/л для В2) из-за увеличения доли подземного питания притоков.

В вариантах Б и В к середине марта вода уже прогрета до 4–7 °С, причем в верховьях температу-

ра ниже из-за влияния водной массы Дона, текущего с севера на юг. Увеличение минерализации — по сравнению с расчетом по данным за 1973 г. — в верховьях достигает 50 мг/л для варианта Б1, 100 мг/л для вариантов Б2 и В1, а для В2 — > 150 мг/л. Поэтому в придонных горизонтах расчетных отсеков I-4 и I-5 начинает формироваться донная водная масса (ДВМ).

С конца марта и до начала сентября температура поверхностного слоя воды в период прямой стратификации водохранилища в прогностических расчетах на 1,5–3 °С превышает значения T_0 в 1973 г. Такое же превышение температуры в этот период вероятно и в придонном слое (рис. 3, б) из-за большего прогрева воды в прогностических сценариях во время мартовской вертикальной изотермии. В середине сентября водная масса начинает охлаждаться,

и температура воды в приплотинном отсеке в диагностическом варианте расчетов и в прогностических расчетах практически сравнивается (с учетом вероятных модельных ошибок). В предзимье по диагностическому расчету формируется обратная стратификация со снижением T_0 у поверхности до 0°C , тогда как в прогностических сценариях сохраняется вертикальная изотермия при температуре от 5 до $2-3^\circ\text{C}$ до конца года.

Модельные расчеты составляющих теплового баланса Цимлянского водохранилища показали, что наиболее сильное увеличение затрат теплоты на испарение (до 1,5 раз) в прогностических сценариях произойдет в летне-осенний период, а также в марте из-за раннего очищения водоема от ледяного покрова. Одновременно в весенне-летний период возрастут теплопотери с эффективным излучением в 2—3 раза и осенью в 1,5 раза. Столь большое увеличение потерь теплоты в период открытой воды предотвращает перегрев водной массы водохранилища в условиях ожидаемого потепления климата. В водном эквиваленте увеличение потерь с испарением составит в среднем за год от 10 (вариант Б1) до 20% (вариант В2). При пониженном уровне воды (32 м абс. и ниже) и сокращающейся при этом площади водной поверхности дополнительное снижение уровня вследствие роста испарения составит всего от 20 (вариант Б1) до 30 см (вариант В2).

Увеличение потерь воды на испарение — один из факторов повышения минерализации воды в водохранилище в степной зоне наряду с увеличением доли питания грунтовыми водами притоков водоема при сокращении слоя стока воды в половодье [16]. Расчет по модели ГМВ—МГУ для варианта А (при наибольшей проточности из всех вариантов) показывает увеличение минерализации воды за период открытой

воды на 15%, что хорошо согласуется с балансовой оценкой, выполненной по методике Н.М. Бочкова [12]. Прогностический расчет по варианту Б1 показал вероятность увеличения суммы ионов в водной массе на 18%, а по варианту В2 — на 20%. Повышение минерализации к осени с 420 до 470 мг/л и соответственно жесткости воды в приплотинном районе неблагоприятно для водного хозяйства Ростовской АЭС.

Выводы:

— многовариантные прогностические модельные расчеты показывают, что при возможном потеплении климата во второй половине XXI в. и сокращении притока воды в Цимлянское водохранилище климатические изменения проявятся наиболее сильно в уменьшении его полезного объема и проточности;

— сократится продолжительность ледостава, с марта будет начинаться вегетационный и навигационный сезон, который в отдельные годы может продлиться до января. Значительного увеличения температуры воды в летний период ожидать не следует, оно ограничится $2-3^\circ\text{C}$ из-за значительного увеличения теплопотерь при испарении и усиливающимся эффективным излучением воды;

— минерализация воды в период весеннего наполнения возрастет в верховьях, а в летне-осеннюю межень — и в приплотинном районе;

— в связи с возможным неблагоприятным сокращением стока воды на юге ЕТР необходимо заранее начать разработку новых диспетчерских правил эксплуатации Цимлянского гидроузла и оценить последствия возможного сокращения подачи воды в оросительные и транспортные системы. Возможно, окажется экологически и экономически целесообразнее осуществлять подпитку Волго-Донского канала не донской, а волжской водой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 3. С. 298—313.
2. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Маньчжские водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 204 с.
3. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1, вып. 3. Бассейн Дона. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 560 с.
4. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1972. Т. 2, вып. 7, 8. Ростов н/Д: Гидрометиздат, 1974. 239 с.
5. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1973. Т. 2, вып. 7, 8. Ростов н/Д: Гидрометиздат, 1975. 313 с.
6. Гречушникова М.Г. Возможные климатические изменения гидрологического режима в долинных водохранилищах // Метеорология и гидрология. 2012. № 10. С. 71—80.
7. Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Прогноз изменений гидрологического режима некоторых водохранилищ ЕТР по модели ГМВ—МГУ // Электрон. сб. 4-й Восточно-Европейской конференции IWA «Опыт и молодость в решении водных проблем». СПб., 2013.
8. Гречушникова М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные изменения гидрологического режима Рыбинского водохранилища при потеплении климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 6. С. 61—67.
9. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера—атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 232 с.
10. Евстигнеев В.М., Кислов А.В., Сидорова М.В. Влияние климатических изменений на годовой сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 2. С. 3—10.
11. Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М. и др. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 3. С. 3—8.
12. Кривенцов М.И. К вопросу о прогнозировании минерализации и химического состава воды водохранилищ // Гидрохимические материалы. 1967. Т. 45. С. 89—106.
13. Менжулин Г.В., Савватеев С.П., Шамшуринов В.И., Петерсон Г.А. Анализ показателей текущих изменений

климата и оценки воспроизведения современного климата моделями, рекомендованными межправительственной комиссией IPCC // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 7—29.

14. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 176 с.

15. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный цикл и другие. М.: Наука, 2005. 190 с.

16. Прогноз минерализации воды Чебоксарского, Саратовского и Нижне-Волжского водохранилищ // Гидрохимические материалы. 1965. Т. 40. С. 3—22.

17. Пуклаков В.В. Структурные особенности и параметризация алгоритма гидрологической модели водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. 1. Гидро- и геодинамические процессы. Пермь: ПГУ, 2011. С. 136—142.

18. Пуклаков В.В., Пуклакова Н.Г., Эдельштейн К.К. Моделирование гидрологического режима Рыбинского водохранилища на основе синтеза боксовой вертикальной и двухмерной горизонтальной моделей // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ: Мат-лы докл. Всеросс. конф., Борок. Ижевск: Издатель Пермьяков, 2012. С. 229—231.

19. Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Мальгин А.И. и др. Моделирование возможных изменений в Онежском озере под влиянием антропогенных и климатических факторов // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий. СПб.: Наука; ВВМ, 2005. С. 351—360.

20. Сидорова М.В. Оценка возможных изменений водных ресурсов Восточно-Европейской равнины в XXI веке // Вода: химия и экология. 2009. № 5. С. 2—7.

21. Уточнение морфологических характеристик Цимлянского водохранилища с целью повышения эффективного режима его эксплуатации. М.: Филиал Гидропроекта, 2005. 145 с.

22. Филатов Н.Н., Литвиненко А.В., Назарова Л.Е. и др. Водные ресурсы Европейского Севера России в условиях изменяющегося климата // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. СПб.: ИОЗ РАН, 2007. С. 3—19.

23. Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Экспериментальная оценка погрешности модельного расчета стратификации водной толщи в водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2005. № 6. С. 20—24.

24. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и Западной Сибири / Под ред. Н.С. Касимова, А.В. Кислова. М.: МАКС Пресс, 2011. 496 с.

25. Golosov S., Terzhevik A., Zverev I. et al. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus. 2012. A, 64, 17264. doi:10.3402/tellusa.v64i0.17264.

26. URL: http://83.149.207.89/GCM_DATA_PLOTTING/documents/climate.pdf (дата обращения: 25.04.2013).

27. URL: <http://file-rf.ru/analytics/101> (дата обращения: 10.10.2013).

28. Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2010. Vol. 46, N 4. P. 414—431.

Поступила в редакцию
10.02.2014

M.G. Grechushnikova, N.G. Puklakova, K.K. Edelshtein

POSSIBLE TRANSFORMATION OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE TSIMLYANSK RESERVOIR UNDER CLIMATE WARMING

Changes in the hydrological parameters of the Tsimlyansk reservoir (flowage, ice and thermal regime, water mineralization, water stratification, etc.) were calculated for the most unfavorable water supply scenario (decreasing annual runoff and high water runoff values).

Key words: hydrological regime, climate warming, annual runoff, high water runoff, Tsimlyansk reservoir.