

УДК 556.18

ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НИЖНЕЙ ВОЛГИ: ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И КОМПЕНСИРУЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

© 2023 г. М. В. Болгов^а, *, А. И. Беляев^а

^аФИЦ Агроэкологии РАН, Волгоград, Россия

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 12.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В статье представлен обзор основных гидрологических и водохозяйственных задач и проблем, возникших в последние десятилетия на Нижней Волге в результате строительства и эксплуатации Волжско-Камского каскада водохранилищ, антропогенных изменений стока, плохо предсказуемых климатических изменений. Изменения стока привели к трансформации водной среды и всей экосистемы реки в целом. Несмотря на ряд компенсационных мероприятий, водные проблемы пока далеки от решения. Все это делает весьма актуальным их исследование. Среди таких проблем – повышение оправдываемости прогнозов притока к водохранилищам, долгосрочное прогнозирование многолетних колебаний стока в условиях происходящих изменений климата, оценка деформации русел в условиях антропогенного воздействия. Последнее особенно важно для нижнего бьефа Волгоградской ГЭС. При прогнозировании поведения экосистем Нижней Волги, с оценкой их устойчивости, требуется дальнейшее развитие методов расчета допустимых воздействий, совершенствование систем мониторинга. Сегодня управление Волжско-Камским каскадом водохранилищ осуществляется на основе диспетчерских правил, насчитывающих не один десяток лет. Показано, что современное управление должно основываться на согласованной системе приоритетов, включающей в себя и экологические критерии. Особенно острые экологические и водохозяйственные проблемы возникли в северной части Волго-Ахтубинской поймы, а также в зоне Западно-подstepных ильменей. Рассмотрены новые методы изучения экологических систем, находящихся здесь в условиях сильного антропогенного стресса, и соответствующие инженерные подходы, позволяющие комплексно подойти к достижению устойчивого управления водными ресурсами. Затрагивается проблема слабо предсказуемых колебаний уровня Каспийского моря, а также проблема управления водными ресурсами региона в условиях противоречивых интересов пользователей. Обсуждаются основные мероприятия, реализация которых позволит смягчить последствия регулирования стока для экосистемы Нижней Волги. Из важных системных принципов отмечена необходимость бассейнового подхода, предполагающего, как минимум, разработку Генеральной схемы использования водных ресурсов Волги.

Ключевые слова: Нижняя Волга, Волго-Ахтубинская пойма, каскад водохранилищ, Западно-подstepные ильмени, гидрологический режим, изменения в результате регулирования стока, водные проблемы

DOI: 10.31857/S2587556623060031, **EDN:** EZEJWU

ВВЕДЕНИЕ

Нижняя Волга – уникальный по географическим особенностям и природным ресурсам регион Российской Федерации, на территории которого сталкиваются интересы различных отраслей экономики, использующих ресурсы реки Волги и Каспийского моря. Развитие экономики предполагает эффективное использование водных и водно-биологических ресурсов, на которые, в свою очередь, существенное воздействие оказывает Волжско-Камский каскад водохранилищ (ВКК). Интересы различных отраслей экономики при использовании водных ресурсов зачастую

противоречивы, поэтому оптимальное решение в области распределения стока между потребителями найти сложно. При этом очевидно, что практически любое антропогенное воздействие оказывает негативное влияние на природную среду.

По отношению к водным ресурсам изучаемый географический регион образует сложную систему, гидрологическая и водохозяйственная специфика которой заключается в том, что единственным источником воды является р. Волга, так как ниже Волгограда, в условиях аридного климата, имеет место только рассеивание стока. Местный сток чрезвычайно мал и определяется, в основ-

ном, запасами влаги в формирующемся снежном покрове. К этому еще можно добавить наблюдаемые в результате глобального потепления изменения речного стока, усложняющие его регулирование, а также слабо прогнозируемые колебания уровня Каспийского моря, определяющие гидрологический режим водотоков в нижней части дельты.

Отрасли экономики в регионе преимущественно ориентируются только на использование волжского стока, поскольку его ресурсы, в количественном выражении, намного превышают местное водопотребление. Основная проблема (или сложность) заключается в том, что в результате строительства и эксплуатации ВКК естественный режим стока р. Волги был кардинально нарушен, и его современное распределение внутри года не отвечает интересам ряда отраслей хозяйства и потребностям экосистем (в первую очередь условиям естественного воспроизводства водных биоресурсов).

Очевидно, что для решения комплекса обсуждаемых проблем должен быть реализован системный подход, заключающийся, с одной стороны, в анализе “индивидуальных” проблем и задач и выяснении их противоречивого характера, а с другой — в попытке найти компромиссное решение, по возможности удовлетворяющее интересы всех участников процесса использования водных и биоресурсов в регионе. Эта задача уже не является инженерно-гидрологической (или инженерно-экологической) и может рассматриваться в рамках разработки документов стратегического планирования региона. Подходы к ее решению определяются как сложившейся в условиях ведения хозяйства практикой водodelения (водопользования) в регионе, так и состоянием организационно-управляющей структуры в регионе, характеризующейся в числе прочего и наличием (или отсутствием) политической воли, необходимой для реформирования сложившихся подходов на основе достижения целей перспективного планирования социально-экономического развития региона (Belyaev et al., 2022).

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

В водохозяйственном плане регион Нижней Волги представляет собой часть бассейна Волги от Волгоградского гидроузла до Каспийского моря, включая Астраханскую область, часть Волгоградской области и Калмыкии (население 2.43 млн чел., 7 городов, 13 поселков, 694 прочих населенных пункта). Кроме рыбного хозяйства, водные ресурсы используются для орошения и обводнения, питьевого и промышленного водоснабжения, поддержания условий судоходства. Нижняя Волга имеет важное транспортное значение, в регионе развит речной и морской транспорт, работа

которого во многом зависит от водности Волги, распределения ее стока по дельтовым водотокам, а также от уровня Каспийского моря. Стратегическое значение приобретает международный транспортный коридор “Север—Юг”, в значительной мере использующий водные объекты региона.

В населенных пунктах Нижней Волги расположены многочисленные промышленные предприятия, сбрасывающие в водные объекты сточные воды различной степени очистки, усугубляя их экологическое состояние, учитывая, что основной объем загрязнений поступает в Нижнюю Волгу из вышележащих участков Волжского бассейна.

Водохранилища Волжско-Камского каскада, изменив естественные гидрологические условия, обеспечивают решение водохозяйственных задач Поволжья и Центральной России в целом, но при этом на Нижней Волге образовался ряд новых проблем: нарушение характера внутригодового распределения стока, и, как следствие, сокращение площадей и продолжительности затопления пойменных (нерестовых) массивов, деградация пойменных водоемов, перекрытие путей миграции на нерест ценных видов проходных и полупроходных рыб, усилившееся антропогенное воздействие на экосистему в целом. Регулирование стока каскадом водохранилищ для безопасного пропуска высоких вод весной и обеспечения водой Нижней Волги в межень осложнено неконтролируемой застройкой нижних бьефов гидроузлов, изменением условий эксплуатации водозаборов и другими новыми требованиями, возникающими в современных условиях (Александровский и др., 2016).

Водохозяйственные проблемы Нижней Волги до настоящего времени почти не исследовались в их комплексном рассмотрении. Попытки решить задачу оптимизации водохозяйственного комплекса Нижней Волги глобально на основе экономических критериев согласования принимаемых решений оказались нереализуемыми, поскольку стоимостные показатели отдельных видов производств (отраслей экономики) несравнимы между собой (Елаховский, 1979). С одной стороны, ресурсы поверхностных вод характеризуются в общем как достаточные, по крайней мере по объему, а с другой — намерение изменить сложившиеся режимы в пользу какого-то другого участника водохозяйственного комплекса представляет собой заведомо неэффективную попытку с точки зрения использования имеющихся ограниченных ресурсов и возможностей регулирования. Тем не менее далеко не самые эффективные подходы до сих пор реализуются на практике, как, например, обводнение зоны Западно-подступных ильменей (далее ЗПИ) за счет принудительной закачки воды по системе трактов, хотя еще в 1970-е годы было показано, что в силу зна-

чительных потерь экономическая эффективность такой схемы обводнения составляет 5–15%.

Проблемы ЗПИ и других водных систем будут рассмотрены ниже, здесь же необходимо сказать, что оптимизационными методами можно добиться согласования принимаемых управленческих решений применительно к неэкономическим критериям и на основе назначаемой системы предпочтений и приоритетов. Имеющиеся водные ресурсы увеличить нельзя (без переброски стока северных рек), так как они определяются климатом бассейна Волги, и в условиях не очень большой емкости водохранилищ каскада (по сравнению с годовым стоком) водохозяйственные проблемы могут быть решены только путем реализации комплекса специальных мероприятий, имеющих локальный характер, и направленных на решение конкретных экономических (хозяйственных) или экологических задач. Среди таких проектов можно отметить дополнительную подачу воды в исток Ахтубы вместе с комплексом работ по мелиорации водных объектов Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), ввод в эксплуатацию Астраханского вододелителя в комплексе с мелиорацией нерестилищ и восстановлением каналов-рыбоходов, переустройство системы обводнения ЗПИ с целью обеспечения приемлемого экологического состояния водных объектов, переустройство водозаборов мелиоративных систем сельскохозяйственного назначения для обеспечения их проектной надежности.

Под воздействием хозяйственной (водохозяйственной) деятельности существенные негативные изменения претерпевают практически все водные экосистемы региона, и возникает проблема нормирования (определения допустимых нагрузок). Десятилетия эксплуатации водных ресурсов Волги привели к новому состоянию всех компонент среды, и разрабатываемые рекомендации должны исходить как из понимания невозможности возврата к прошлому состоянию, так и, несомненно, не допускать дальнейшей деградации природной среды. Результаты мониторинговых исследований показывают, что экосистема региона (ВАП) пребывает в некотором новом устойчивом состоянии, характеризующимся в целом пониженным уровнем биопродуктивности, новым состоянием сообществ, наличием инвазивных видов и прочими в целом деградированными компонентами водной среды (Кузьмина, Трешкин, 2017).

Дальнейшее развитие водохозяйственного комплекса Нижней Волги должно исходить из понимания факта нового устойчивого состояния, сформировавшегося под преимущественным влиянием техногенного фактора, и рекомендуемые мероприятия должны определяться (и проектироваться) исходя из новых “рамочных” условий. Уже

упоминавшаяся зона ЗПИ может рассматриваться сегодня как совокупность водных объектов в тех новых границах, какие могут быть обводнены в условиях зарегулированного стока. В силу тех же обстоятельств ВАП не может более рассматриваться в тех же границах, которые соответствовали ее обводнению до создания ВКК.

Сказанное необходимо дополнить возникновением новых рыночных механизмов, определяющих инвестиции в отдельные отрасли экономики региона, осуществляющие использование водных ресурсов, и формирующих “текущие” ограничения на использование водных ресурсов.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

Гидрография Нижней Волги

Современное гидрографическое строение бассейна Нижней Волги имеет ряд особенностей. Непосредственно ниже Волгоградского гидроузла берет начало современная Ахтуба — левый рукав Волги. При строительстве ГЭС р. Ахтуба оказалась перегороденной глухой земляной плотиной и для ее обводнения водой из Волги в 6 км ниже створа сооружений гидроузла прорыт канал протяженностью 6,7 км, получивший название Волго-Ахтубинский. На 47 км ниже гидроузла расположено начало Волго-Донского судоходного канала. На расстоянии 140 км Ахтуба вплотную сближается с Волгой, а на расстоянии 460 км от Волгоградского гидроузла влево отходит первый большой рукав дельты — Бузан.

Дельта Волги занимает площадь 19 тыс. км², расстояние между крайними западным и восточным рукавами составляет 170 км. Дельта Волги делится на три основные зоны: верхнюю и среднюю (482 водотока), и нижнюю зону с интенсивными (около 800) разветвлениями русел (Устьева ..., 1998). На 462 км выше г. Нариманов и на 22 км ниже истока р. Бузан построен Астраханский вододелитель, перегораживающий Волгу и создающий подпор таким образом, что при его работе часть стока направляется в рукав Бузан, увеличивая продолжительность затопления Восточной части дельты. Продолжением рукава Бахтемир является Волго-Каспийский канал, обеспечивающий соединение речной и морской частей транспортного коридора, эксплуатация которого сопровождается большими объемами дноуглубительных работ.

Климатические изменения в стоке р. Волги

Многолетние колебания речного стока в бассейне Волги являются предметом многочисленных исследований, результаты которых отражены и в настоящем выпуске журнала. Актуальной за-

дачей является анализ и прогноз происходящего в последние десятилетия в результате климатических изменений перераспределения стока Волги внутри года при сохранении в целом характера его многолетних колебаний (стационарности). Для выяснения характера изменений стока существующие ряды средних многолетних расходов бокового притока к основным гидроузлам Волжско-Камского каскада были разделены на две части: с начала наблюдений в 1914 и до 1969 г. включительно, а также с 1970 г. по настоящее время. Для каждого периода методом компоновки сезонов Андреянова-Лифшица было получено расчетное внутригодовое распределение стока для пяти градаций водности года: особо многоводный, многоводный, средней водности, маловодный, особо маловодный.

Полученные результаты выявили существенные изменения внутригодового распределения стока, особенно в маловодные периоды. Наиболее чувствительной характеристикой оказался сток зимней межени во все годы (многоводные и маловодные). Сток половодья в маловодные годы изменился не столь существенно, в основном в пределах 10–15%. Для многоводных лет характерно уменьшение стока в период половодья на большинстве водохозяйственных участков.

В целом, по результатам статистических расчетов, можно сделать следующий вывод: в результате климатических изменений в бассейне Волги произошло перераспределение стока внутри года, выражающееся в уменьшении стока половодных периодов, и в заметном увеличении стока маловодных периодов (летне-осенней и зимней межени) во всех градациях водности. Выявленные особенности сказываются и на характере регулирования стока: в последние десятилетия заметно сократился объем предполоводной сработки основных регуляторов ВКК, что говорит о необходимости корректировки Правил использования водных ресурсов волжских водохранилищ. Детальные современные оценки климатически обусловленных изменений притока к водохранилищам ВКК приведены в (Многолетние ..., 2017), а также обсуждаются в ряде других работ (Болгов и др., 2014, 2016).

Проблема колебаний уровня Каспийского моря

Гидрологический режим большей части водотоков дельты Волги находится под влиянием колебаний уровня Каспийского моря, основную роль в формировании которых играют приток и испарение с водной поверхности моря (Крицкий, Менкель, 1964; Крицкий и др., 1975). При стационарном в целом характере временной изменчивости этих процессов в гидрологическом режиме моря и р. Волги тем не менее имеется несколько особенностей. В тридцатые годы прошлого столе-

тия во временном ряду годового стока Волги выделяется период экстремального маловодья, вероятность которого в Марковском стационарном приближении оценивается как 1 раз в 900–1000 лет. Этот маловодный период непосредственно сказывается на связанных со стоком Волги колебаниях уровня Каспийского моря — отмечается падение уровня моря в этот же период, вероятность которого, по оценкам В.Е. Привальского (1985), составляет примерно 1 раз в 2000 лет. Продолжившееся затем в течение нескольких десятилетий снижение уровня моря закончилось в 1979 г. и сменилось резким подъемом уровня на 2.5 м за последующие 15 лет. Этому же году соответствует и смена на большинстве рек в бассейне Волги маловодного периода на многоводный, продолжившийся до конца 1990-х годов. Начиная с 1995 г. уровень моря в основном падает, причем различными темпами.

Долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря может быть получен как решение уравнения его водного баланса в виде динамико-стохастической модели, в основу которой положены стохастические модели многолетней изменчивости компонентов уравнения водного баланса — притока и видимого испарения с учетом амортизационного механизма колебаний уровня моря (Привальский, 1985).

Стохастическое дифференциальное уравнение водного баланса решается методом имитационного моделирования. Такой подход позволяет решить вероятностную задачу без ограничений на вид маргинальных распределений, морфометрических зависимостей и прочих нелинейных связей (Раткович, Болгов, 1994). Продолжительные ряды уровней моря получаются путем многократного решения уравнения водного баланса на год вперед с учетом оттока в залив Кара-Богаз-Гол. Вероятностный прогноз уровня Каспия можно представить как в виде параметров условного распределения (условные среднее, дисперсия, асимметрия и пр.), так и в виде набора квантилей условных распределений вероятности. Прогноз уровня моря зависит от начальных условий (уровень в году выпуска прогноза), но с заблаговременностью до 40 лет можно сказать, что наиболее неблагоприятный прогноз (уровень 0.1% обеспеченности) составляет –25.8 м, а наиболее низкий уровень (99% обеспеченности) составляет –30.7 м. Подробное изложение современного состояния проблемы прогнозирования Каспия, а также другие подходы к анализу его колебаний, можно найти в (Болгов и др., 2018б; Водный ..., 2016) и других изданиях.

Гидравлические особенности Волго-Ахтубинской поймы

Большое количество прикладных гидрологических задач требует знания гидравлических характеристик водотоков. Гидравлика системы водотоков Нижней Волги сложна и эффективно исследуется средствами математического моделирования. Расчет неустановившихся течений в сложных русловых системах с поймой в большинстве случаев можно осуществлять с помощью одномерных гидравлических моделей на основе системы уравнений Сен-Венана, хотя известны и более простые подходы, основанные на классических методах прогноза трансформации паводочных волн. Модель движения речного потока на участке бассейна Нижней Волги от Волгоградской ГЭС до Каспийского моря разработана на основе программного продукта “SOBEK” Дельфтской гидравлической лаборатории (Отчет ..., 2016).

Структура модели представляет собой последовательную совокупность всех расчетных точек и участков русел по рукавам и протокам Волги, ее дельты, Ахтубы и Волго-Ахтубинской поймы от нижнего бьефа Волгоградского водохранилища до морского края дельты. Для учета пойменного регулирования в структуре модели создается дополнительная сеть имитационных каналов и емкостей, которые компенсируют влияние выхода русловых потоков на пойму и изменение водного баланса на промежуточных створах. В структуру модели для расчетов включены все основные рукава и протоки дельты и Волго-Ахтубинской поймы, ширина которых в период межи превышала 20–25 м. Входные граничные узлы гидродинамической модели Нижней Волги расположены в Нижнем бьефе Волгоградской ГЭС, шлюзовом канале и старом русле реки Ахтубы. Выходные граничные узлы расположены в низовьях дельты практически на взморье Каспийского моря.

С помощью описанной выше гидродинамической модели исследовались гидравлические режимы рек и водотоков Волго-Ахтубинской поймы, режимы работы астраханского водodelителя, оценивались последствия регулирования стока для системы ЗПИ. Модель показала хорошую применимость на различных масштабах воспроизведения (от отдельных озер и ериков, до всей системы Нижней Волги в целом). Дальнейшее развитие модели связано с организацией сети специальных мониторинговых наблюдений, позволяющей отслеживать происходящие изменения водотоков и осуществлять калибровку параметров.

Водохозяйственные проблемы нижней Волги

Современный гидрологический режим Нижней Волги определяется условиями регулирова-

ния стока на всем Волжско-Камском каскаде, но роль основного регулятора в системе играет Куйбышевское водохранилище. Основные изменения, произошедшие в режиме стока Волги в результате работы ВКК, а частично вследствие изменения климатических условий, сводятся к следующему (Отчет ..., 2016):

- возникновение не характерных для естественного режима периодов колебания стока и уровней воды — суточных и недельных;

- значительное сокращение объема стока весеннего половодья и увеличение водности межени, особенно зимней;

- сокращение продолжительности половодий и сокращение фазы подъема половодья в силу особенностей принятых методов регулирования стока;

- изменение температурного режима и, как следствие, нарушение ледового режима;

- изменение гидролого-морфологического режима водотоков.

Экологически эффективное использование стока в бассейне Нижней Волги заключается в весеннем затоплении пойм в оптимальные сроки, необходимом для обводнения сельскохозяйственных площадей и наполнения ильменей, в поддержании стабильных уровней воды в период нереста и для возможности схода молоди рыбы в основные русла с их многочисленными протоками, а также для обеспечения судоходства, водоснабжения и функционирования водозаборов. Рассмотрим далее основные проблемы, возникающие при управлении водными ресурсами.

Проблемы регулирования уровня воды на Волго-Ахтубинской пойме и дельте Волги

Если до зарегулирования Волги пойменные земли затоплялись почти ежегодно, то в последние десятилетия частота затопления ВАП сократилась в среднем в два раза, а необходимые для рыбного и сельского хозяйства продолжительность и глубина затопления обеспечиваются только в 35% лет. Особенно неблагоприятные условия для естественного воспроизводства биоресурсов складываются в маловодные годы, когда объемы рыбохозяйственных попусков резко снижаются. Назначение графика весенних попусков в нижнем течении Волги является сложнейшей водохозяйственной задачей, зависящей от особенностей развития половодья в бассейнах Волги и Камы, общей водохозяйственной обстановки, температуры воды и воздуха, хода нереста рыб в низовьях Волги, заявок на воду сельского хозяйства и других отраслей (Беднарук, Мотовилов, 2017). Тем не менее во многие годы искусственные попуски по срокам и темпам их нарастания и падения, продолжительности пиков и величине

расходов воды не обеспечивают требований рыбного хозяйства.

В практике управления ВКК предусматривалась организация целевых весенних пусков в нижний бьеф Волгоградского гидроузла с учетом работы Нижневолжского вододелителя, который был сдан в эксплуатацию в 1976 г. Назначение вододелителя — создание в вершине дельты Волги временного подпора с тем, чтобы при весенних паводковых расходах от 12 до 25 тыс. м³/с обеспечить подачу воды в р. Бузан расходом 8–9 тыс. м³/с для оптимального затопления рыбных нерестилищ восточной дельты (Отчет ..., 2016). В 1981 г. были утверждены правила эксплуатации вододелителя, однако он ни разу не работал в проектом режиме. В современных условиях вододелитель практически не используется, поскольку изменение режима затопления восточной части дельты может нанести ущерб сельскому хозяйству западной части дельты и ЗПИ. По мнению ихтиологов, при проектировании и строительстве вододелителя недостаточно были учтены все особенности существования и воспроизводства наиболее ценных осетровых рыб Волго-Каспийского бассейна.

Для сельского хозяйства и влагозарядки поймы в современных условиях предпочтительным является компактный остропиковый гидрограф расходов воды через Волгоградский гидроузел, а для рыбного хозяйства, наоборот, необходимо обеспечение плавного подъема уровней воды с середины апреля до конца мая — начала июня, затем плавного спада и стояния воды на полях не менее 45–50 сут. Несмотря на то, что в период пусков обеспечиваются уровни, необходимые для затопления нерестилищ, длительность стояния этих максимальных уровней значительно меньше, чем в естественных условиях, и составляет не более 4–8 дней. Для рыбного хозяйства оптимален объем весеннего пуска до 120 км³ в средние по водности и до 90 км³ в маловодные годы (Катунин, 2014; Отчет ..., 2016). Очевидно, что регулирование стока по графику, благоприятному для естественного воспроизводства биоресурсов, приведет к уменьшению объема аккумулируемого в водохранилищах весеннего стока, который предназначен для обеспечения транспортных пусков летом и на выработку электроэнергии зимой, и, соответственно, к снижению степени гарантии соответствующих отдач.

Для обеспечения обводнения ВАП, как отмечалось выше, построен Волго-Ахтубинский канал. Он должен был обеспечить р. Ахтубу волжской водой в количестве, необходимом для поддержания существующих и перспективных систем водоснабжения и орошения, включая разные варианты устройства лиманного орошения. В настоящее время при пуске в нижний бьеф ГЭС 4000 м³/с расход Ахтубы в устье составляет менее 50 м³/с, а

при меньшей водности Волги расход воды в Ахтубе может падать до нуля. В нижнем бьефе Волгоградского гидроузла существует проблема размыва основного русла р. Волги, в результате которого произошло понижение (посадка) уровня воды до 1.5 м, а деформация Волго-Ахтубинского канала, в том числе в результате саморазмыва, привела к изменению гидравлического режима водообмена между Волгой и Ахтубой. Для поступления достаточных объемов воды в р. Ахтубу в современных условиях требуются сбросные расходы воды 28000–29000 м³/с, что возможно далеко не каждый год и только в период половодья. Современные исследования показывают, что эта ситуация не стабилизируется.

Водохозяйственные проблемы ЗПИ

Наиболее сложная водная проблема сложилась в системе ЗПИ. Система ильменей примыкает с запада к дельте Волги. Их общая площадь около 892 тыс. га, в том числе в Астраханской области — 550 тыс. га, в Республике Калмыкия — 342 тыс. га. Территория представляет собой равнину, рельеф которой характеризуется наличием своеобразных форм — бугров Бэра с межбугровыми понижениями, занимаемыми ильменями. До зарегулирования стока Волги ильмени имели хорошую гидравлическую связь с западными рукавами дельты. Вода из Волги во время половодий проникала в западном направлении на 50–70 км. На спаде половодья направление течения в системе ильменей изменялось, и вода возвращалась в Волгу. В целом в системе озер поддерживался уклон водной поверхности в направлении с севера на юг, в результате чего наблюдался промывной режим и поддерживалось благополучие экосистемы.

Произошедшие изменения условий обводнения ЗПИ связано в основном с последствиями регулирования стока Волги, которое привело к срезке пиков половодий и уменьшению их длительности и, соответственно, к резкому преобразованию гидрологического режима ильменей. На гидрологический режим ильменей оказывает влияние также комплекс мелиоративных мероприятий по регулированию обводнения территории: постройка дамб, перемычек, насыпей, дорог, перегораживающих водотоки; прокладка искусственных водных трактов с принудительной подачей воды в ильмени; широкое применение орошения и осушения крупных ильменей.

Изменение водно-солевого режима ильменей ведет к изменению видового состава растительности. В результате площадь ильменей сокращается, а на местах бывших ильменей образуются солончаки, исчезает растительность и животный мир, изменяется микроклимат и рельеф местности. Вопрос сохранения ильменного ланд-

шафта решался путем создания сетей государственных оросительных систем, которые по естественным и искусственным каналам подают волжскую воду не только в ильмени, но и на орошение сельскохозяйственных угодий, а также на обводнение и водоснабжение многочисленных населенных пунктов, расположенных на территориях Наримановского, Икрянинского и Лиманского районов Астраханской области. Основная проблема состоит в том, что финансирование управлений оросительных систем недостаточное, гидротехнические сооружения находятся в изношенном состоянии, водоподающие каналы и протоки заиливаются, что в целом негативно сказывается на экологической обстановке. В последние десятилетия ЗПИ обводняются только в многоводные годы и лишь в пределах узкой прибахтемирской полосы.

Существует ряд предложений по улучшению водохозяйственной обстановки в районе ЗПИ. В проектных разработках, выполненных Ленгипроводхозом, рекомендуется выполнить работы по мелиоративному и сельскохозяйственному обустройству прибахтемирской полосы шириной 5–15 км и юго-восточной части территории в районе райцентра Лиман с целью интенсификации сельскохозяйственного производства (в основном бахчевые) в этой ограниченной зоне. КаспНИРХ рекомендует вселение белого амура в оросительно-обводнительные тракты на ЗПИ с целью биологической мелиорации. Годовой прирост амура в этих условиях позволяет добывать в каналах 480 т рыбы. Однако биологическая мелиорация водоподающих трактов, конечно, не может являться решением всех проблем.

В настоящее время ЗПИ эксплуатируются по экстенсивному типу с полным пренебрежением к требованию экономии водных ресурсов. Положение в этом регионе может быть улучшено только путем радикальных преобразований методов и форм хозяйствования. Перспективным представляется рыбохозяйственный вариант использования ЗПИ в той их части, которая наиболее пригодна для этого по ряду морфометрических, гидрогеологических и других показателей.

Проблемы заиливания рыбоходных каналов

В условиях низкого стояния уровня Каспийского моря, начиная с конца 1950-х годов прошлого века, отмелая зона устьевоего взморья Волги начала интенсивно зарастать, что стало препятствием для прохождения на нерест и обратно осетровых рыб. Причиной послужил низкий уровень моря и, как следствие, малые глубины и распресненная вода в мелководной зоне. Для улучшения условий нереста и нагула молоди в отмелой зоне в 1960-х годах были построены основные рыбоходные каналы общей протяженностью око-

ло 900 км. В настоящее время в отмелой зоне существует 2 судоходных канала, 8 магистральных каналов-рыбоходов и 16 вспомогательных каналов-рыбоходов, не имеющих выхода на приглубое взморье (Отчет ..., 2016). Каналы дополнялись прокосами, которые представляют собой расчищенные от высшей водной растительности полосы шириной 10–60 м вдоль и поперек отмелой зоны.

Трассировка некоторых каналов выполнялась без учета преобладающих направлений струйных стоковых течений, что явилось одной из причин их интенсивного заиливания. Само строительство каналов также способствовало зарастанию отмелой зоны, так как отвалы грунта на бровках каналов служили очагами распространения высшей водной растительности (Болгов и др., 2007).

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБВОДНЕНИЕ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ ИЗ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Существующее неблагоприятное состояние Волго-Ахтубинской поймы связано с недостаточной водностью р. Ахтубы, сложившейся в результате строительства Волгоградского гидроузла. В верхней части поймы уровень воды Ахтубы расположен выше среднего уровня воды Волги, поэтому верхняя часть Волго-Ахтубинской поймы заполняется во время половодья водой, в первую очередь, из Ахтубы. Необходимо увеличить количество поступающей в Ахтубу воды как в половодье, так и в межень и обеспечить подачу воды из Ахтубы в основные водные объекты верхней части поймы.

Увеличение водности Ахтубы возможно путем направления в ее исток воды непосредственно из Волгоградского водохранилища или из Волги ниже гидроузла с помощью насосных установок. Обводнение ВАП предлагается осуществлять в два этапа. Первый этап – самотечное поступление воды из Волги в Ахтубу в половодье на подъеме и пике сбросного гидрографа за счет превышения уровней воды в Волге по существующему Волго-Ахтубинскому каналу. Расходы в верховье Ахтубы в этот период достигают 1500–2500 м³/с. Второй этап начинается после снижения сбросного расхода воды в нижнем бьефе Волжской ГЭС до 10–12 тыс. м³/с, когда прекращается поступление воды из Волги в Ахтубу и включается система водоподдачи в исток Ахтубы непосредственно из водохранилища в течение летней межени с расходами, обеспечивающими поддержание экологически требуемого водного режима в водных объектах на территории ВАП.

Принципиальная схема дополнительной водоподдачи в систему водных объектов Волго-Ахтубинской поймы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема дополнительной водоподачи в систему водных объектов Волго-Ахтубинской поймы (синие стрелки — направление потока в период весеннего половодья, красные стрелки — направление подачи воды в период летней межени за счет механической подачи).

Источник: (Отчет ..., 2016).

При обводнении в Ахтубе установится уровень воды выше, чем в Волге, и вода обратным током будет поступать из Ахтубы в Волгу через Волго-Ахтубинский канал (см. рис. 1). Потребуется выполнить мероприятия, препятствующие перетоку воды из Ахтубы в Волгу. Таким мероприятием может служить регулирующее сооружение, представляющее собой низкую переливную плотину, частично сужающую живое сечение истока Ахтубы на участке присоединения к Волге.

В зависимости от подаваемого объема воды будет достигаться различный режим обводнения на различных по площади участках поймы. Для пропуска воды из Волгоградского водохранилища в Ахтубу планируется водопропускное сооружение, которое располагается на левом берегу водохранилища за пределами сооружений напорного фронта гидроузла. Предусмотрено устройство

гидроэлектростанции на тракте водоподачи из водохранилища в исток Ахтубы, что позволит компенсировать энергозатраты при работе намечаемых насосных станций в нижнем бьефе, подающих воду из Ахтубы в водные объекты поймы.

Проектируемая ГЭС позволит вырабатывать в год ориентировочно 130 млн кВт/ч электроэнергии, из которых 30 млн кВт/ч будет израсходовано на работу насосных станций первого подъема. Рекомендуется вариант с объемом водоподачи 100 м³/с, обеспечивающий необходимое обводнение водотоков и водоемов верхней части Волго-Ахтубинской поймы, который обоснован расчетами гидродинамической модели затопления Волго-Ахтубинской поймы.

Регулирующее сооружение в Волго-Ахтубинском канале (современном истоке Ахтубы) обес-

печивает независимый от уровня воды в Волге гидравлический режим в Ахтубе при низких уровнях воды в Волге и представляет собой низконапорную переливную плотину, сужающую живое сечение русла Ахтубы в сочетании с обводным каналом для улучшения условий маломерного судоходства. Плотина и обводной канал располагаются в створе острова, делящего русло на две протоки.

В основную схему водоподачи, кроме подводящего канала, системы водоводов, шлюза и ГЭС, входят головные насосные станции (ГНС), подающие воду непосредственно из Ахтубы в систему ериков и озер северной части Волго-Ахтубинской поймы. Расположение головных насосных станций и водные объекты (водотоки и водоемы) Волго-Ахтубинской поймы определяется положением основных трактов водоподачи на пойме.

Необходимо отметить, что в настоящее время силами проектных организаций разрабатывается проект обводнения Ахтубы в другой компоновке, предусматривающей создание регулирующих сооружений в самой Ахтубе и существенно больший объем водозабора из Волгоградского водохранилища преимущественно на нужды орошения в регионе.

СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА

Один из основных методов улучшения экологического состояния Нижней Волги — это изменение правил управления ВКК для достижения более высокой степени гарантии характеристик стока, определяющих естественные условия воспроизводства биоресурсов.

Для формирования попусков в системе гидроузлов ВКК в оперативном режиме разработана математическая модель, алгоритм и вычислительная технология (ВТ) функционирования водохранилищ, реализующая оптимизационный подход при решении задачи оперативного управления гидроузлами в период весеннего половодья (Болгов и др., 2017, 2018а, 2019). Методика основана на использовании методов многокритериального анализа (теории компромиссов) и позволяет осуществлять поиск компромиссных решений в интересах различных водопользователей (водоснабжение, гидроэнергетика, транспорт, экология, сельское и рыбное хозяйство и др.). Предлагаемая технология реализована для девяти крупных водохранилищ ВКК: Рыбинского, Нижегородского, Чебоксарского, Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского на Волге и Камского, Воткинского и Нижнекамского на Каме, суммарный полезный объем которых составляет 78 км³.

Основным критерием управления водными ресурсами является конфигурация спецпуска,

описывающая характер затопления сельскохозяйственных угодий и нерестилищ Нижней Волги. В спецпуске задаются следующие фазы: “подъем” — нарастание расхода, “сельскохозяйственный попуск” — фаза пропуска постоянного максимального расхода для затопления пойменных лугов (24500–27000 м³/с, продолжительностью 5–10 дней), “рыбохозяйственный попуск” — фаза пропуска постоянного максимального расхода для поддержания оптимальных режимов нереста (14000–20000 м³/с, продолжительностью 14–23 дня), “спад” — фаза убывания расходов, “транспортный попуск” — фаза навигации (не менее 5000 м³/с).

На основе решения ряда оптимизационных задач формируется множество недоминируемых решений, из которых методом достижимых целей и соответствующим аппаратом визуализации, может быть выбрано “оптимальное” в смысле Парето решение (Лотов, 2002). Окончательное на текущую дату решение принимается в процессе обсуждения всего множества полученных недоминируемых решений на заседании Межведомственной рабочей группы МРГ, органа, ответственного за принятие решений по регулированию режимов работы водохранилищ ВКК. Инструментарием для визуализации результатов и быстрого принятия компромиссного решения служит программа Pareto Front Viewer, разработанная в вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН (Лотов, 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая современное состояние водообеспечения и в целом проблем в области управления водными ресурсами на Нижней Волге, можно сказать следующее:

1. Гидрологический режим в низовьях Волги претерпел существенные изменения как в результате регулирования стока водохранилищами, так и по причине климатических изменений. Произошедшие изменения стока привели к существенным изменениям природной, в частности водной, среды. Эти негативные эффекты частично прогнозировались при проектировании каскада, и потому был запланирован и реализован набор компенсационных мероприятий. Тем не менее возник ряд новых экологических, технических и научных проблем, требующих для своего решения комплексного подхода, а эффективность запланированных мероприятий оказалось недостаточной.

2. Блок научных проблем предполагает дальнейшее развитие методов решения инженерно-гидрологических задач таких, как повышение оправдываемости прогнозов притока к водохранилищам, долгосрочное прогнозирование многолетних колебаний стока в условиях происходя-

щих изменений климата, получение актуальных оценок негативных процессов — деформации русел, переработки берегов. В части прогнозирования поведения экосистем Нижней Волги с оценкой их устойчивости требуется развитие методов оценки допустимых воздействий, развитие систем мониторинга их состояния.

3. Управление Волжско-Камским каскадом водохранилищ должно основываться на согласованной системе приоритетов, включающей в себя и экологические критерии. Полноценная оптимизационная постановка задачи поиска оптимального управления каскадом сегодня вряд ли возможна по причине сложности получения сравнимых оценок ущерба и выгод для всех участников водохозяйственного комплекса, но подходы, основанные на поиске, например, компромиссного решения на уровне договоренности сторон, вполне реализуемы.

4. Наиболее сложные водохозяйственные задачи возникли в северной части Волго-Ахтубинской поймы, а также в зоне ЗПИ. Для решения этих задач необходимы новые методы изучения экологически неблагоприятных систем и соответствующие инженерные подходы, позволяющие комплексно подойти к достижению устойчивого управления водными ресурсами региона.

5. Для реализации поставленных задач необходим бассейновый подход, предполагающий, как минимум, разработку Генеральной схемы использования водных ресурсов р. Волги.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленные в статье результаты исследования и обобщения проблем Нижней Волги получены в последние годы при выполнении ряда научных тем в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН (тема FNFE — 2022-0011, государственная регистрация 122020100450-9).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам ФГБУ ГОИН к.ф.-м.н. Землянову И.В., с.н.с. Горелиц О.В., а также зав. отделом ФГБУН ВНИИГИМ Буберу А.Л. за предоставленные данные и полезные обсуждения.

FINANCING

The results of the study of the Lower Volga problems presented in the article have been obtained in recent years with the implementation of a number of scientific topics and grants. The work was carried out within the framework of the State Task of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences (topic FNFE — 2022-0011, state registration 122020100450-9).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the staff of the FSBI GOIN Ph.D. I.V. Zemlyanov, O.V. Gorelits, as well as the head of the department of the FSBI VNIIGIM A.L. Buber for the data provided and useful discussions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Ю., Клименко В.В., Терешин А.Г. Особенности функционирования гидроэнергетики России в изменяющихся внешних условиях (на примере Волжско-Камского каскада ГЭС) / под общ. ред. А.Ю. Александровского и В.В. Клименко. М.: Энергия, 2016. 170 с.
- Беднарчук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство. 2017. № 7. С. 22–35.
- Болгов М.В., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. Ч. 1. Стратегическое планирование // Водные ресурсы. 2018а. № 5. С. 573–580.
- Болгов М.В., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. Ч. 2. Тактическое планирование и оперативное управление // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 333–344.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филиппова И.А. Речной сток и вероятностный прогноз уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2018б. № 10. С. 17–26.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72–81.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события / отв. ред. М.Г. Хубларян. М.: Наука, 2007. 380 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
- Елаховский С.Б. Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. Вопросы оптимизации режимов. М.: Энергия, 1979. 192 с.
- Катунин Д.Н. Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. Астрахань: ФГУП “КаспНИРХ”, 2014. 478 с.

- Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 159 с.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. 1964. № 12. С. 29–61.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Оценка изменений наземных экосистем Нижней Волги при зарегулировании // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23. № 4 (73). С. 22–34.
- Лотов А.В. Компьютерная визуализация оболочки Эджворта-Парето и ее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Информационные Технологии и Вычислительные Системы. 2002. № 1. С. 83–100.
- Многолетние характеристики притока в крупнейшие водохранилища РФ. Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: ООО “РПЦ Офорт”, 2017. 132 с.
- Отчет о НИР “Научное обоснование мероприятий, обеспечивающих рациональное использование водных ресурсов и устойчивое функционирование водохозяйственного комплекса Нижней Волги, сохранение уникальной системы Волго-Ахтубинской поймы”, в рамках реализации федеральной целевой программы “Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах”, в 4 частях. Москва, ГОИН, Государственный контракт № 10-ГК/ФЦП-2013, 2013–2016 гг.
- Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры). М.: Наука, 1985. 183 с.
- Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 389–404.
- Устьевая область Волги: Гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря / отв. ред. В.Ф. Полонский, В.Н. Михайлов, С.В. Кирьянов. М.: ГЕОС, 1998 г.
- Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Korneeva E.A. Assessment of ecosystem services of wetlands of the Volga-Akhtuba floodplain // Sustainability. 2022. Vol. 18. № 14. P. 11240.

Water Problems of the Lower Volga: Main Factors and Compensating Measures

M. V. Bolgov¹, * and A. I. Belyaev¹

¹Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

The article presents an overview of the main hydrological and water management tasks and problems that have arisen in recent decades on the Lower Volga because of the construction and operation of the Volga-Kama cascade of reservoirs, anthropogenic changes in runoff as a result of economic activity, and the consequences of poorly predictable climatic changes. It is shown that the hydrological regime in the lower reaches of the Volga River has undergone significant changes, both as a result of regulation of runoff by reservoirs and due to climatic changes. The observed changes in flow fluctuations have led to serious changes in the aquatic environment and the entire ecosystem of the river. A number of negative consequences were predicted during the development of reservoir cascade projects, and the construction and operation processes were accompanied by the implementation of a set of compensatory measures of a fisheries' nature. Nevertheless, the functioning of a complex water management system and insufficient attention to environmental problems led to the emergence of new environmental, technical, and scientific problems that required an integrated approach for their solution, and the effectiveness of the planned measures turned out to be insufficient. The study of the consequences of seasonal regulation of runoff by reservoirs, changes in the estimates of water resources, the involvement of new methods of studying the hydrological system, including multi-arm channels, and the analysis of anthropogenic-altered river sections allowed to obtain new results but at the same time to formulate a block of unresolved scientific problems. Among such problems, there is a need to solve such engineering and hydrological tasks as increasing the feasibility of forecasts of inflow to reservoirs, long-term forecasting of long-term fluctuations in runoff under conditions of ongoing climate change, obtaining up-to-date estimates of negative processes—deformation of riverbeds under anthropogenic impact. The latter is very important for the downstream of the Volgograd Hydroelectric Power Station. In terms of predicting the behavior of the ecosystems of the Lower Volga, with an assessment of their stability, further development of methods for assessing permissible impacts, the development of monitoring systems for their condition is required. The management of the Volga-Kama cascade of reservoirs is a complex scientific and technical task. Today, this management is carried out on the basis of dispatching rules dating back more than a dozen years. It is shown that modern management should be based on a coordinated system of priorities, including environmental criteria. The required optimization formulation of the task of finding optimal cascade control can be based, for example, on the search for a compromise solution at the level of agreement of the parties. A set of environmental and water management problems unsolvable for decades has been formed in the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain as well as in the zone of the Western-subtidal *ilmens* (system of lakes in the Volga River Delta). To solve these problems, new methods of studying ecological systems under severe anthropo-

genic stress and appropriate engineering approaches that allow a comprehensive approach to achieving sustainable water resources management are considered. The problem of poorly predictable fluctuations in the level of the Caspian Sea and the problem of water resource management in the region in conditions of conflicting interests of users are touched upon. The main measures are discussed, whose implementation will mitigate the consequences of flow regulation for the ecosystem of the Lower Volga. Among the important system principles, the need for a basin approach is noted, which involves, at a minimum, the development of a General Scheme for the Use of Water Resources of the Volga River.

Keywords: Lower Volga, Volga-Akhtuba floodplain, cascade of reservoirs, Western Sub-Steppe Ilmen, hydrological regime, changes because of flow regulation, water problems

REFERENCES

- Alexandrovsky A.Yu., Klimenko V.V., Tereshin A.G. *Osobennosti gidroenergetiki Rossii v izmenyayushchikhsya vneshnikh usloviyakh (na territorii Volzhsko-Kamskogo kaskada GES)* [Features of the Functioning of the Hydropower Industry of Russia in Changing External Conditions (on the Example of the Volga-Kama Cascade of Hydroelectric Power Plants)]. Alexandrovsky A.Yu., Klimenko V.V., Eds. Moscow: Energia Publ., 2016. 170 p.
- Bednaruk S.E., Motovilov Yu.G. Technology of information support in the management of cascades of reservoirs. *Hydrotech. Construct.*, 2017, no. 7, pp. 22–35. (In Russ.).
- Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Korneeva E.A. Assessment of Ecosystem Services of Wetlands of the Volga-Akhtuba floodplain. *Sustainability*, 2022, vol. 18, no. 14, p. 11240. <https://doi.org/10.3390/su141811240>
- Bolgov M.V., Buber A.L., Komarovskiy A.A., Lotov A.V. Searching for Compromise Solution in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 1. Strategic Planning. *Water Resour.*, 2018a, vol. 45, pp. 819–826. <https://doi.org/10.1134/S0097807818050044>
- Bolgov M.V., Buber A.L., Komarovskiy A.A., Lotov A.V. Search for Compromise Decisions in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 2. Tactical Planning and Dispatching Control. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, pp. 480–491. <https://doi.org/10.1134/S0097807819030047>
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Filippova I.A. Bayesian prediction of minimum river runoff under nonstationary conditions of future climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 497–503. <https://doi.org/10.3103/S1068373916070074>
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Present-day variations of the minimum runoff of the Volga basin rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 187–194. <https://doi.org/10.3103/S1068373914030078>
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filippova I.A. River Runoff and Probabilistic Forecast of the Caspian Sea Level. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018b, vol. 43, pp. 639–645. <https://doi.org/10.3103/S1068373918100023>
- Bolgov M.V., Krasnozhen G.F., Lyubushin A.A. *Kaspiiskoe more. Ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya* [The Caspian Sea. Extreme Hydrological Events]. Khublaryan M.G., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2007. 380 p.
- Elakhovskiy S.B. *Gidroelektrostantsii v vodokhozyaystvennykh sistemakh. Voprosy optimizatsii rezhimov* [Hydroelectric Power Plants in Water Management Systems. Problems of Optimization of Modes]. Moscow: Energia Publ., 1979. 192 p.
- Katunin D.N. *Gidroekologicheskie osnovy formirovaniya ekosistemnykh protsessov v Kaspiiskom more i del'te reki Volgi* [Hydroecological Foundations of the Formation of Ecosystem Processes in the Caspian Sea and the Volga River Delta]. Astrakhan: FSUE "KaspNIRKh" Publ., 2014. 478 p.
- Kritskiy S.N., Korenistov D.V., Ratkovich D.Ya. *Kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya* [Fluctuations of the Caspian Sea Level]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 159 p.
- Kritskiy S.N., Menkel M.F. Fluctuations in the level of closed reservoirs. *Proc. Hydroproect*, 1964, no. 12, pp. 29–61. (In Russ.).
- Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. Assessment of changes in terrestrial ecosystems of the Lower Volga during over-regulation. *Arid. Ecosys.*, 2017, vol. 73, no. 4, pp. 22–34. (In Russ.).
- Lotov A.V. Computer visualization of the Edgeworth-Pareto shell and its application in intelligent decision support systems. *Inform. Tekhnol. Vychisl. Sist.*, 2002, no. 1, pp. 83–100. (In Russ.).
- Mnogoletnie kharakteristiki pritoka v krupneishie vodokhranilishcha RF. Nauchno-prikladnoi spravochnik* [Long-Term Characteristics of Inflow to the Largest Reservoirs of the Russian Federation. Scientific and Applied Reference]. Georgievskiy V.Yu., Ed. Moscow: "RPTS Ofort", 2017. 132 p.
- Nauchnoe obosnovanie meropriyatii, obespechivayushchikh ratsional'noe ispol'sovanie i ustoichivoe funktsionirovanie vodokhozyaystvennogo kompleksa Nizhnei Volgi, sokhranenie unikal'noi sistemy Volgo-Akhtubinskoi poimiy. Otchet o NIR, podgotovleniy v ramkakh realizatsii federal'noi tselevoy programmy "Razvitie vodokhozyaystvennogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii v 2012–2020 godakh" (v 4 chastyakh)* [Scientific Substantiation of Measures Ensuring Rational Use of Water Resources and Sustainable Functioning of the Water Management Complex of the Lower Volga, Preservation of the Unique System of the Volga-Akhtuba Floodplain].

- R&D Report Prepared Within the Framework of the Federal Target Program “Development of the Water Management Complex of the Russian Federation in 2012–2020” (in 4 parts). Moscow: GOIN, 2013–2016. (In Russ.).
- Privalskii V.E. *Klimaticheskaya izmenchivost' (stokhasticheskie modeli, predskazuemost', spektry)* [Climatic Variability (Stochastic Models, Predictability, Spectra)]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 183 p.
- Ratkovich D.Ya., Bolgov M.V. Investigation of probabilistic patterns of long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea. *Water Resour.*, 1994, vol. 21, no. 4, pp. 389–404. (In Russ.).
- Ust'evaya oblast' Volgi: Gidrologo-morfologicheskie protsessy, rezhim zagryaznyayushchikh veshchestv i vliyaniye kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya* [The Estuary Region of the Volga: Hydrological and Morphological Processes, the Regime of Pollutants and the Influence of Fluctuations in the Level of the Caspian Sea]. Polonskii V.F., Mikhailov V.N., Kir'yanov S.V., Eds. Moscow: GEOS Publ., 1998.
- Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovaniye i prognoz* [Water Balance and Fluctuations of the Caspian Sea Level. Modeling and Forecasting]. Moscow: Triada Ltd. Publ., 2016. 378 p.