
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ,
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ**

УДК 556.048:51:681.3(470.44/.47)

**ЗАДАЧИ И ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НИЖНЕЙ ВОЛГИ**

© 2013 г. М. В. Болгов, Л. К. Левит-Гуревич

Институт водных проблем РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 3

E-mail: lev-gur@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.12.2010 г.

Нижняя Волга — уникальный по природным богатствам регион России, на территории которого сталкиваются интересы различных отраслей народного хозяйства, использующих водные ресурсы. Хозяйственное развитие региона требует эффективного управления водными ресурсами в увязке с природными условиями и работой Волжско-Камского каскада водохранилищ. Надежным инструментом управления является компьютерная система поддержки водохозяйственных решений для Нижней Волги. Решаемые в рамках системы задачи соответствуют существующим водным проблемам региона. Приведены сведения о внедряемых и подлежащих разработке программах, дана модель вододеления, показан путь совместного выбора режима управления Волжско-Камским каскадом и использования водных ресурсов Нижней Волги.

Ключевые слова: Нижняя Волга, водные ресурсы, оперативное управление, Волжско-Камский каскад водохранилищ, поддержка водохозяйственных решений

DOI: 10.7868/S0321059613050027

В водохозяйственном плане регион Нижней Волги представляет собой подбассейн Волги (рис. 1) от Волгоградского гидроузла до Каспийского моря, включая Астраханскую область, часть Волгоградской области и Калмыкии (2.43 млн чел., 7 городов, 13 поселков, 694 прочих населенных пунктов). Нижняя Волга — уникальный природный район мирового значения. Флора представлена 300 видами растений, фауна — около 30 видами животных и десятками видов птиц. Но главное богатство — рыба; в регионе насчитывается 60 видов рыб. По обилию и концентрации ценных видов дельте Волги нет равных в мире.

Кроме рыбного хозяйства, экономика Нижней Волги, основанная на использовании водных ресурсов, имеет другие важные направления: орошение и обводнение, питьевое и промышленное водоснабжение. На орошаемых землях выращиваются овощи, бахчевые культуры, зернобобовые. При водообеспечении и современных водных технологиях площадь бассейна Нижней Волги можно использовать под хлопчатник, сахарную свеклу, виноградники, сады и пр. [26]. Нижняя Волга имеет важное транспортное значение, в регионе развит речной и морской транспорт, работа которого за-

висит от водности Волги, распределения ее стока по дельтовым водотокам.

В городах и поселках сосредоточены объекты пищевой и легкой промышленности. Машиностроение, металлообработка, химия и нефтехимия Волгограда и Астрахани являются крупными водопотребителями. Судостроительно-судоремонтные заводы на берегах рек испытывают негативное влияние русловых процессов. Топливная промышленность — специализация Астраханской обл., где расположено крупнейшее в европейской части России газоконденсатное месторождение и газовый комплекс. Все промышленные предприятия — “поставщики” сточных вод в водные объекты.

Экономическая жизнь региона находится под существенным влиянием водного режима Волги. Водоохранилища Волжско-Камского каскада, изменив естественные гидрологические условия, решают водохозяйственные проблемы экономики Поволжья. На Нижней же Волге появились другие проблемы: нарушение характера внутригодового распределения стока, перекрытие путей миграции на нерест ценных видов проходных и полупроходных рыб, антропогенное воздействие.

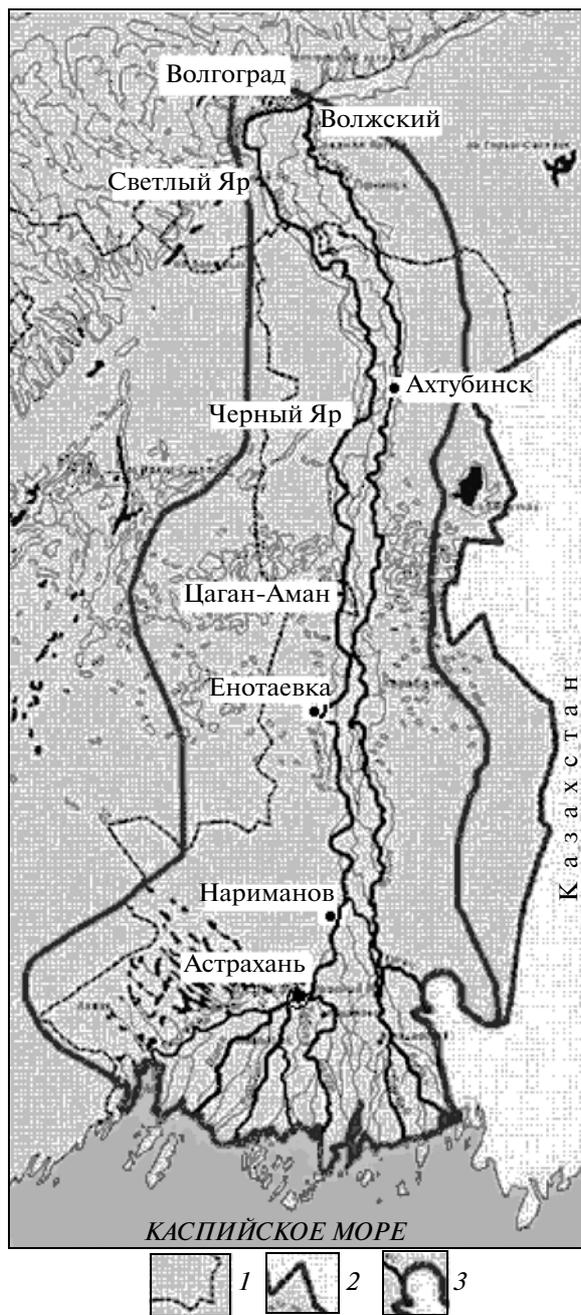


Рис. 1. Карта-схема региона Нижней Волги в границах водосборной площади и областей: 1 – границы областей, 2 – граница РФ, 3 – граница водосборной площади.

Регулирование стока Саратовским и Волгоградским водохранилищами для безопасного пропуска высоких вод и обеспечения водой Нижней Волги в межень осложнено неконтролируемой застройкой нижних бьефов, изменением условий водозаборов и пр.

Проблемам Нижней Волги и возможностям их решения посвящено много научных работ [6, 11,

12, 23]. Гидрологический анализ стока и его изменений, многолетние характеристики половодий в естественных и зарегулированных условиях даны в [6, 21, 24]; зимний и весенний периоды, рыбохозяйственные и навигационные требования к водному режиму хорошо разобраны в [22]. Ряд проблем Нижней Волги связан с накоплением наносов в Волгоградском водохранилище [21]. Эффективность рыбного хозяйства, требования к водному режиму показаны в [25]. Однако до настоящего времени почти не разрабатывалась компьютерная поддержка выработки водохозяйственных решений, без которой современное управление водными ресурсами невозможно. Водные и водохозяйственные научные дисциплины располагают достаточным числом методов и программ расчета, но разработок специально для Нижней Волги почти нет.

НИЖНЯЯ ВОЛГА

Волга в нижнем течении не имеет притоков. После Волгоградского гидроузла (г/у) (условная шкала – 0 км) Волга до Астрахани течет в низменных берегах. Ниже гидроузла берет начало Ахтуба – левый рукав Волги. Междуречье – Волго-Ахтубинская пойма площадью 14 тыс. км², шириной 20–40 км. На всем своем протяжении пойма прорезана многочисленными рукавами, протоками, воложками, ериками, имеет массу мелководных озер, множество сравнительно крупных островов. В 47 км ниже гидроузла начинается Волго-Донской судоходный канал.

В 140 км ниже Волгоградского г/у расположено с. Каменный Яр, где Ахтуба почти вплотную сближается с Волгой. Пойму между ними прорезает широкая Молочная протока; здесь – небольшой участок Калмыкии протяженностью по реке всего 12 км. Далее вниз расположен рук. Енотаевский, на правом берегу находится с. Верхнелебяжье – граница между Волго-Ахтубинской поймой и дельтой Волги. В 460 км влево от Волгоградского г/у отходит первый большой рукав дельты – Бузан.

Дельта Волги занимает площадь 19 тыс. км², расстояние между самым западным и самым восточным рукавами – 170 км. Дельта Волги делится на зоны: верхнюю и среднюю (482 водотока), нижнюю с многочисленными (около 800) разветвлениями русел. Водотоки верхней и средней зон различаются по крупности: одно основное русло, 5 рукавов, 127 протоков, 305 ериков. 16 банок, 28 каналов – всего 482 водотока.

Выше г. Нариманова и в 22 км ниже истока р. Бузан расположен Астраханский вододеливатель, перегородивший Волгу так, что при его работе можно часть стока регулировать по Волге, а часть — направлять по р. Бузан и заливать восточную часть дельты. Бузан начинает восточную часть дельты, вододеливатель расположен в голове западной части. Главные рукава здесь — Бахтемир, Камызяк, Старая Волга, Болда, Сарбай. На 508 км от Волгоградского г/у вдоль рукавов Трусовский и Городской тянется Астрахань. Ниже отходят левые рукава Кривая Болда и Кизань, правый — Бахтемир. По нему и по Волго-Каспийскому каналу осуществляется судоходство до Каспийского моря. От Волги далее отходят рукава Каныча (левый), затем Сомовка (правый). Ниже их (в 570 — 627 км от Волгоградского г/у) ряд небольших рукавов Волги впадает в Каспийское море, значительно обмелев.

ПРОБЛЕМЫ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

Источник водохозяйственных проблем Нижней Волги — уникальные природные условия: гидрографические, ландшафтные, топографические, климатические — на фоне проблем сбалансированности экономического развития всей реки и региона. Эффективное использование стока в бассейне Нижней Волги заключается в своевременном весеннем затоплении пойм для поддержания ёмкости сельскохозяйственных площадей и наполнения ильменей, выдерживании стабильных уровней воды во время рыбного нереста, обеспечения возможности схода молоди рыбы в основную реку и многочисленные протоки, поддержание уровней и расходов реки для обеспечения судоходства, водоснабжения и водозаборов. Серьезное влияние на рыбохозяйственное и иное использование реки оказывает качество воды; оно определяется сбросами из Волгоградского водохранилища, водоотведением в пределах самого региона, состоянием очистных сооружений, водоохранными мероприятиями. Ниже перечисляются проблемы, с которыми сталкивается водное хозяйство на Нижней Волге.

Пропуск низкого половодья. При низких сбросных расходах из Волгоградского водохранилища в период половодья невозможно наполнение ильменей и затопление нерестовых участков достаточной площади. Возникают трудности в организации “рыбной полки” гидрографа паводкового сброса из Волгоградского водохранилища (поддержание постоянного расхода с целью сохранения постоянных уровней на нерестовых участках). Отказ от “сельскохозяйственной полки” сбросного

гидрографа и затопления пойм на 5–7 сут приводит к определенным экономическим потерям; невозможность организации “рыбной полки” создает еще большие потери, связанные с уменьшением рыбного стада, что сказывается на рыбной отрасли в течение последующих лет. Приемлемые параметры “рыбной полки”: расходы 21–24 тыс. м³/с, продолжительность 19–21 сут [25].

Работа вододеливателя. С начала ввода в эксплуатацию в 1977 г. вододеливатель применялся лишь 6 раз, но, по данным [25], его работа имела экономический эффект. Некоторые ихтиологи считают, что деление воды причиняет осетровым потери, ухудшая условия миграции, но превалирует взгляд о целесообразности возобновления работы вододеливателя [11]. Есть идеи о строительстве других вододеливателей и регулирующих сооружений в дельте.

Назначение Нижневолжского вододеливателя состоит в создании подпора и подаче в р. Бузан 8–9 тыс. м³/с воды, затапливающей Восточную часть дельты и нижнюю часть Волго-Ахтубинской поймы при удержании воды вододеливательной дамбой. Восточная часть дельты расположена ниже западной и заливается при меньших расходах. При уровне у вододеливателя по водопосту Астрахани в 250 см восточная часть дельты заливается на 54, западная — на 33%, при 300 см — на 82 и 56% [2]. Достаточное затопление нерестилищ и сельскохозяйственных угодий восточной и западной частей дельты обеспечивается сейчас при расходах воды в ее вершине не менее 24 тыс. м³/с. Расход воды в Бузанах величиной 8–9 тыс. м³/с обводняет Волго-Ахтубинскую пойму и восточную дельту с нерестилищами в 215 тыс. га. Требования к условиям нереста рыбы и затопления ильменей диктуют необходимость использования вододеливателя и возможность регулирования расходов вододеливателя в определенном диапазоне.

Западные подстепные ильмени. Ильмени, расположенные в западной подстепной зоне, в период паводка в прошлом пополнялись водой по 30 естественным протокам, что создавало благоприятные условия для нереста. Западные подстепные ильмени (четверть Волжской дельты, 5 тыс. км²) за последние годы утратили свое рыбохозяйственное значение: расположенные по цепочке озера обмелели, обсохли и превращаются в безжизненные и соленые озера. Рыбный промысел в западных подстепных ильменах при их возрождении может составить альтернативу промысловому лову в остальной части дельты. Могут быть развиты и промыслы, связанные с другими видами биоресурсов [26]. Проблемы западных под-

степных ильменей решаются только путем их водообеспечения на серьезной технической и водохозяйственной основе: строительство насосных станций, обустройство трактов водоподачи, обеспечения рационального режима водоподачи.

Водный транспорт. В нижнем бьефе Волгоградского г/у, с одной стороны, растет грузооборот, с другой стороны, произошла и продолжается “посадка” уровней. Для полного обеспечения судоходных глубин в настоящее время требуются расходы воды не менее 5 тыс. м³/с, их реализация связана с повышенной регулирующей нагрузкой на водохранилища Волжско-Камского каскада. Необходимо рациональное вододеление, строительство подпорных и других русловых сооружений, что положительно влияет также на обводнение земель дельты и поймы, караванный способ прохода судов.

Пропуск высокого половодья. Высокое половодье и повышенные половодные расходы создают угрозу несанкционированных затоплений, подтоплений, прорыва дамб, в особенности в пределах дельты. Приемлемый допустимый сбросный расход Волгоградского г/у составляет 27 тыс. м³/с. Сбросные расходы весеннего половодья 30–31 тыс. м³/с являются граничными, при которых возможен прорыв ограждений, затопление и пр. Расходы выше 33–34 тыс. м³/с даже в краткие сроки неотвратимо влекут за собой возникновение чрезвычайных ситуаций с непредсказуемыми последствиями.

Обоснование режима регулирования стока Волги с учетом интересов Нижней Волги. Эта проблема выходит за рамки Нижней Волги и заключается в достижении верных соответствий экономических и социальных выгод или ущерба всего Поволжья складывающимся водным условиям при управлении работой Волжско-Камского каскада водохранилищ.

Водоснабжение и орошение в сельском хозяйстве. Нехватка воды для питьевых и технических нужд и орошения возникает с наступлением маловодья не только из-за нехватки стока, но и по причине посадки уровней за многие годы. Уровни реки во многих местах не соответствуют положению водозаборов. На Ахтубе при сильном обмелении в межень невозможно подавать воду на орошаемые участки. При сильной засухе перебои с водой испытывает, по некоторым данным, каждый третий житель Астраханской обл. Решение проблемы состоит в реконструкции насосных станций, трактов водоподачи, очистных сооружений, в использовании подземных вод, соблюдении режима рационального водопользования.

Подпор Каспийского моря, нагоны. Нагоны продолжительностью от 12 до 48 ч происходят чаще в холодный период года 2–3 раза в месяц. Высота нагона достигает 100–120 (иногда 295) см. Затопление суши при больших нагонах на побережье достигает 20–25 км. Нагоны создают аварийные ситуации, затопление и подтопление населенных пунктов, оросительных систем, нефтепромыслов. Решить проблему можно только путем укрепления берегов и развития системы предупреждений.

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Система поддержки принятия решений (СППР) вырабатывает и предоставляет весь расчетный материал, необходимый для выбора действий лицом (коллективом), принимающим решение (ЛПР) [14, 29].

СППР – сложная система, рассматриваемая как совокупность компонент, или обеспечений: технического (вычислительная техника), проблемного (водохозяйственные проблемы, расчетные задачи), математического (методы формализации и решения задач), программного (компьютерные программы), информационного (система данных для расчетов), методического (система методик и инструкций), организационного (порядок работы СППР). По обеспечением строится пользовательская документация и регламентируется работа СППР (предмет методической и организационной компонент).

СПВР для Нижней Волги должна работать при вероятностном характере поступающих из Волгоградского г/у водных ресурсов и метеорологических условий, влияния Каспийского моря, а также меняющихся водохозяйственных требований на фоне трендов развития экономики региона. Поэтому СПВР – постоянно действующая система, эксплуатируемая в режиме отслеживания водохозяйственной обстановки и решения задач оперативного управления водой, а также планирования отрасли.

СПВР в программном плане состоит из информационного и проблемных блоков. Информационный блок зачастую эксплуатирует стандартную базу данных (БД) геоинформационной системы (ГИС) [28]. ГИС поддерживает пространственную природную информацию с возможностью сбора, хранения, увязки, обработки данных в стандартном формате и с обеспечением выдачи данных пользователю в любой удобной для него форме (карты, схемы, таблицы). Каждый из проблемных программных блоков имеет свою

Оптимальное распределение воды по основным частям Нижней Волги для вариантов среднесуточных сбросных расходов из Волгоградского г/у в период “рыбной полки” (в первых трех вариантах маловодья учтено частичное заполнение ильменей к началу периода “рыбной полки”, в остальных вариантах “сельскохозяйственной полки” нет)

Сброс Волгоградского г/у, м ³ /с	20000	19000	18000	17000	16000	15000	14000
Заполнение ильменей Ахтубинской поймы, %	96	94.5	93.5	91	87	73	50
Расход к вододелителю, м ³ /с	19450	17900	16300	14700	13900	13250	12800
Расход на западную часть дельты, м ³ /с	10200	9550	8650	8350	7950	7600	7500
Заполнение ильменей западной части дельты, %	94.5	94	93	92	87	85.5	81
Расход на восточную часть дельты, м ³ /с	9250	8350	7650	6350	5950	5650	5300
Заполнение ильменей восточной части дельты, %	95	88	72	71	69	69	58.6
Среднеквадратичное отклонение от условий нормы водного режима, %	13.4	18.4	22.8	29.1	32.0	35.7	41.9

специализированную базу данных; создаются интерфейсы, связывающие общую БД со специализированными базами блоков для обеспечения единого ведения информации. Отличие СПВР от простого набора программ состоит именно в обеспечении связей между информационной, проблемной, а также методической и организационной компонентами, что позволяет искать водохозяйственные решения, обоснованные по всем аспектам проблемы.

СПВР для Нижней Волги в настоящее время только начинает создаваться. В информационный блок СПВР будут входить базовые данные по гидрографическому описанию Нижней Волги, местоположению населенных пунктов и хозяйственных объектов, данные о рациональном режиме уровней и расходов и пр. (пока заполнены частично). Результаты некоторых расчетов будут храниться для возможности адаптивного управления водными ресурсами Нижней Волги (т.е. с учетом опыта возникавших характерных ситуаций). Центральные задачи проблемных блоков — самые востребованные для решения водохозяйственных проблем Нижней Волги: гидравлическое моделирование и моделирование распространения загрязняющих веществ. СПВР целесообразно дополнить программами выбора режимов рационального водопользования.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА НИЖНЕЙ ВОЛГЕ

Компьютерная основа гидравлической модели Нижней Волги — программа SOBEK (DELTA HYDRAULICS SOFTWARE (фирма WL/Delft Hydraulics, Голландия). В модели на основе чис-

ленного решения в конечных разностях уравнений Сен-Венана (уравнений движения и неразрывности потока) по морфометрическим характеристикам в различных створах реки (площадь живого сечения, гидравлический радиус, коэффициент сопротивления), начальным уровням воды и граничным условиям вычисляются расходы, уровни, скорости течения на всех участках сети в любом рукаве и створе потока.

Характер изменения уровней и расходов воды в дельте позволяет считать движение воды в течение значительной части года квазиустановившимся (резкие кратковременные изменения объемов и скоростей движения отсутствуют). Поэтому для условий межени в дельте применяется одномерная модель. Однако в половодье, когда поток идет по пойме и в нижней части дельты течения разных протоков при подъеме уровня объединяются в одно широкое водное пространство, одномерная задача гидравлики неправомерна — используется двумерная математическая модель [1, 10].

Для одномерной модели разработана русловая сетка, для которой назначены узлы и участки от нижнего бьефа Волгоградского водохранилища по всем рукавам до морского края дельты. В сеть включены все основные рукава и протоки, действующие в период межени, ширина которых ориентировочно превышает 20–25 м. Для половодья используется расширенная сетка с учетом затопленных в период половодья ячеек и изменения граничных условий. В процессе расчета как в одномерной, так и в двухмерной моделях при переходе к расширенной расчетной сетке и обратно к русловой учитываются уровни в сечениях русловой сетки. Водный режим ильменей моделирует-

ся дополнительной программой; связь ее с основной программой для реки осуществляется путем учета в узлах расчетной сетки объемов забора воды в половодье при подъеме уровней и сбросе воды обратно в реку в конце половодья. Система двух программ для гидравлической модели позволяет проводить расчет во времени на участках со сложным ильменным рельефом (западные ильмени – р. Бахтемир, восточные – р. Бузан).

Локальная база данных гидролого-морфометрических характеристик реки создана на основе космических снимков бассейна Нижней Волги, топографических (масштаб 1 : 100000) и лоцманских (1 : 25000) карт с учетом характерных точек русел (острова и перегибы, разветвления и пр.). Положение расчетных узлов с поперечными сечениями выбиралось с учетом рисунка гидрографической сети, местоположений постов наблюдений и населенных пунктов. Для обеспечения большей точности расчетов в автоматическом режиме добавлены расчетные точки через каждые 500 м по длине водотоков. Таким образом, модель последовательно обрабатывает 7035 участков с учетом 5761 расчетных точек. Модель речной системы Нижней Волги имеет один входной граничный узел в створе Волгоградской ГЭС и одиннадцать выходных узлов на выходе водотоков к морю. Граничные условия – ежедневные расходы воды в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС и уровни Каспийского моря на постах наблюдений [5].

Апробация и накопленный опыт показали возможность постоянного использования модели для вычислений уровней воды на Волге и Ахтубе, в рукавах дельты по заданным расходам в вершине речной системы в межень и в половодье. Следует периодически проводить анализ достоверности данных и ежегодно отслеживать все изменения.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

В СПВР блок расчетов распространения загрязнений позволяет проследить влияние стационарных сбросов загрязняющих веществ (ЗВ) предприятиями, он особенно важен при возникновении аварийных ситуаций на реке. Программный комплекс предназначен для оперативного расчета двумерного распространения ЗВ по руслу реки. Комплекс позволяет в течение 20–30 мин ввести данные по аварии, рассчитать распределение грязи и получить серию карт-схем, показывающих распределение пятна ЗВ в русле реки и траекторию пятна в назначенные моменты времени в течение нескольких дней, а также серию графиков, показывающих обстановку в заданных ство-

рах реки в различные моменты времени. Программная анимация позволяет просмотреть движение пятна ЗВ в пространстве и во времени.

Основой модели является система дифференциальных уравнений динамики и массопереноса; использовалась система уравнений мелкой воды в интегральной форме; дискретизация уравнений основана на идеях, изложенных в [7, 8, 13], с решением уравнений по разностной сетке модифицированным методом продольно-поперечной прогонки [9, 20].

Временной шаг для разностной схемы определяется полуэмпирической методикой, позволяющей находить лучшее значение шага для сеточной области на заданном интервале времени. Начальные и граничные условия – стационарный фон.

Информация для расчета состоит из базовых и оперативных данных. Базовые данные включают в себя конфигурацию берегов, положение островов, рельеф дна, поля скоростей течения в сечениях, описывающие гидродинамические режимы реки, список ЗВ, их необходимые характеристики и фоновые концентрации. Базовые данные в специальной справочной системе программного комплекса готовятся пользователем заранее с помощью специальных программ, так как подготовка их сложна и занимает много времени, как и расчеты полей скоростей в сечениях на предварительном этапе. Однако базовые данные, полученные заранее, используются многократно. В настоящее время определены поля скоростей воды для расходов 4000, 5000, 6000, 7000 м³/с. Предусмотрен расчет влияния на водную среду консервативных и неконсервативных ЗВ. В качестве ЗВ неконсервативного типа рассматривается нефть. Помимо процессов диффузии и разбавления ЗВ основным течением, на скорость деградации нефти влияют абиотические и биотические факторы, температура воды в период распада нефти [4]. При подготовке базовых данных назначается количество узлов вдоль и поперек реки, осуществляется ввод данных и построение разностной сетки с произвольной выпуклой формой ячеек, что адекватно аппроксимирует физическую область расчета.

Оперативные данные включают в себя описание источников ЗВ, которые могут быть заданы в любых местах реки, и характеристики расхода и концентрации ЗВ. Задается время суток сброса ЗВ – одновременно может быть задано до трех источников одного типа в предположении, что ЗВ одновременных сбросов смешиваются. Рассматриваются три характеристики реки в расчетный

момент: расход воды, температура и наличие/отсутствие льда.

По результатам расчетов формируется анимационный фильм, отображающий движение пятен загрязнения по реке, а также серия графиков изменений максимальной концентрации ЗВ вдоль русла и динамических графиков изменений концентраций ЗВ в заданных сечениях. Программный комплекс имеет удобный пользовательский сервис, апробирован на Нижней Волге и детально изучен при исследованиях распространения ЗВ на 310-километровом участке от г. Волгограда до вододелителя.

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОДЕЛЕНИЕМ НА НИЖНЕЙ ВОЛГЕ

Распределение водных ресурсов в водотоках Нижней Волги должно обеспечить наполнение озер и ильменей и поддержание этого наполнения для сохранения жизни водоемов, создать условия для рыбного нереста на заливных площадях, обеспечить режим расходов, необходимый для промышленного и коммунального водоснабжения, водного транспорта. В высокое половодье и полноводную межень вододеление неактуально. В периоды низкого половодья и межени рациональное управление вододелением необходимо в интересах хозяйственных отраслей и для сохранения экологического благополучия – в целях сохранения их в допустимых пределах. Водные ресурсы на Нижней Волге регулируются посредством гидротехнических сооружений: шлюзов, насосных станций, водозаборов на водотоках (обеспечивающих поступления воды к озерам и ильменям), вододелителей. Основное вододеление проводится между западной и восточной частями дельты.

Важно включить в состав СПВР расчетный блок выбора рационального режима пропуска низкого половодья и меженных расходов. Математическая модель задачи основана на информации об “эффективных” объемах наполнения ильменей, соответствующих наилучшим условиям эксплуатации, “эффективных” уровнях затопления нерестилищ (следовательно, расходов командных водотоков), “эффективных” экологических и допустимых навигационных расходах и расходах, обеспечивающих водоснабжение. Для расчета задаются начальные наполнения ильменей, прогноз гидрографа сброса Волгоградского г/у. Результаты расчетов включают в себя: расходы по участкам реки, объемы наполнения ильменей, уровни затопления пойм, расходы водоснабжения – при минимальной сумме ущербов по всему бассейну и рассматриваемым периодам времени.

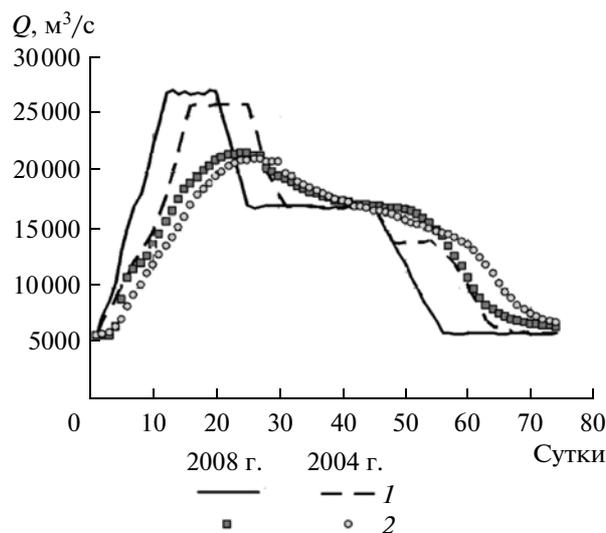


Рис. 2. Гидрографы среднесуточных расходов половодий в 2008 и 2004 гг. 1 – сброс Волгоградского г/у, 2 – расходы в вершине дельты (по мониторингу работы Волгоградского г/у и уровней у Волжского вододелителя и кривой $Q(Z)$).

Существенной особенностью формализации проблемы является структура водотоков, представляющая собой на плане сеть с единственной точкой поступления воды – Волгоградским г/у и множеством вершин – разветвлений водотоков и впадений их в море. Однако, выделяя крупные рукава и гидравлически связанные с ними малые водотоки в отдельные формализованные участки, можно представить структуру Нижней Волги в виде графа – “дерева” с “корнем” у Волгограда, “стволом” – Волго-Ахтубинской системой и двумя “ветвями” – западной и восточной дельтами. Другая особенность формализации – представление сбросов Волгоградского г/у в виде лестницы расходов (рис. 2). Период постоянства среднесуточного сбросного расхода есть период управления вододелением. Между ступенями лестницы осуществляется промежуточное вододеление. Можно рассматривать установившееся движение воды на водотоках и процесс наполнения ильменей равномерными, а потери воды и расходы на водоснабжение постоянными.

Пусть i – нумерация узлов речной сети (вершин графа); r – нумерация участков или водотоков (дуг); по участку r вода течет от узла i_r^o к узлу i_r^* , $r(i) = \{r : i_r^o = i\}$ – множество участков, выходящих из i -го узла; $R(i)$ – множество всех участков ниже i -го узла; $\rho(i)$ – участок, входящий в узел i (единственный); $I(i)$ – множество соседних i -му

нижележащих узлов; i_0 – корневой узел дерева речной сети; τ – нумерация водохозяйственных периодов; Δt_τ – продолжительность, сут; $V_r^o, V_{r\tau}^o, V_{r\tau}^*, V_{r\tau}^{eff}$ – сумма объемов водоемов, привязанных к r -му участку в период τ : соответственно начальное наполнение, наполнение в начале, в конце периода, эффективное наполнение; $Q_{r\tau}^o, Q_{r\tau}^*, Q_{r\tau}^{eff}$ – расходы на r -м участке в период τ : соответственно в начале участка, в конце, эффективный расход. В эти периоды из водоемов и участков реки забирается вода (среднесуточные расходы – $q_{r\tau}^V$ и $q_{r\tau}^Q$) на водоснабжение, вегетационные и другие поливы, насыщение почв при затоплениях, испарение – для Нижней Волги это важная статья водохозяйственных балансов. Средний за период расход водотока представим как функцию от средних наполнений ильменей и расходов на участках: $q_{r\tau}^V = f(V_{r\tau})$ и $q_{r\tau}^Q = f(Q_{r\tau})$, $V_{r\tau} = (V_{r\tau}^o + V_{r\tau}^*)/2$, $Q_{r\tau} = (Q_{r\tau}^o + Q_{r\tau}^*)/2$. От наполнений ильменей и от расходов участков зависят хозяйственные и гидравлические показатели для каждого периода, в том числе ущербы $Y_{r\tau}$ от несоответствия наполнений и расходов эффективным значениям.

Вместо ущербов проще оперировать оценками качества водного режима E на ильменях и участках реки, что удобно выражать в виде отношения текущих наполнений или расходов к эффективным значениям – $E \leq 1$. Относительные оценки качества, косвенно выражая ущербы, привязаны к реальным показателям наполнения водоемов и расходам участков реки, отслеживая условия водопользования. Ущерб обратен пропорционально (примерно) оценкам водного режима: $Y \approx 1/E$. Использование оценок качества позволяет избежать необходимости поиска абсолютных ущербов (сумма их минимизируется), поскольку расчет ущербов является чрезвычайно сложной в информационном плане задачей. Система взвешенных оценок определяет как бы шкалу водопользования для отдельного водного объекта, отрасли ($E = 1$ – обеспечены лучшие условия водопользования, $E < 1$ – условия водопользования не обеспечены). Пусть $e_{jr\tau}(Q_{r\tau}, V_{r\tau})$ – оценка выполнения условий j -й деятельности для участка r с ильменями в период τ . Относительные оценки не являются аддитивными показателями, поэтому действия обобщения и оптимизации проводятся с обратными оценкам величинами, интерпретируемыми как “условные ущербы”: $y_{jr\tau} = 1/e_{jr\tau}$ (в общем виде: $Y = 1/E$). Оценка для всего участка найдется по взвешенной сумме обратных величин

$Y_{r\tau} = 1/E_{r\tau} = \sum_j [p_{j\tau}(1/e_{jr\tau})]$, где доли хозяйственных направлений $\sum_j p_{j\tau} = 1$.

Задача формулируется так: по заданному входному гидрографу $Q_{i_0}(\tau)$ в узел i_0 речной сети, имеющий вид “дерева” речных участков с привязанными к ним системами водоемов (озер и ильменей), по периодам τ определить расходы участков и наполнения водоемов при достижении минимума взвешенной суммы “ущербов” за рассматриваемые периоды:

$$\sum_\tau \left[p_r \times \left(\sum_r Y_{r\tau} \right) \right] \Rightarrow \min \quad (1)$$

при условиях баланса расходов в узлах речной сети и баланса расходов по участкам реки:

$$Q_{\rho(i),\tau}^* = \sum_r Q_{r\tau}^o, \quad \forall i, \tau, \quad (2)$$

$$Q_{r,\tau}^o - Q_{r,\tau}^* = q_{r,\tau}^V + q_{r,\tau}^Q + (V_{r,\tau}^* - V_{r,\tau}^o)/(\gamma \times \Delta t_\tau), \quad \forall r, \tau, \quad (3)$$

где p_r – коэффициенты сравнительной важности речных участков, $\sum_r p_r = 1$, $\gamma = 86400$. Далее коэффициенты узлов p_i обозначены как сумма p_r всех нижележащих i участков.

Для решения задачи используется метод динамического программирования в модификации [17], применимой при нескольких индексациях шагов, – в данном случае шаги по участкам речной системы совместно с шагами по установленным периодам управления. Целесообразна реализация компьютерной программы расчета. Расчет ведется по таблицам от начального момента в прямом порядке периодов и по узлам речной сети от моря последовательно вверх по узлам водотоков до начального узла с заданным гидрографом расходов. Если $Y_{i,\tau}(Q_{\rho(i),\tau}^*; V_{R(i),\tau}^*)$ – минимальный “ущерб” всей нижней по отношению к узлу i части дельты от начального момента до конца периода τ , то его величина как функция от подходящих к узлу расходов $Q_{\rho(i),\tau}^*$ (средних в периоде) и наполнений $V_{R(i),\tau}^*$ (к концу периода) всех нижележащих водоемов следующая:

$$Y_{i,\tau}(Q_{\rho(i),\tau}^*; V_{R(i),\tau}^*) = \min \left\{ \sum_{i^* \in I(i)} [p_{i^*} Y_{i^*,\tau}(Q_{r,\tau}^*; V_{R(i^*),\tau}^*)] + \sum_{r \in I(i)} [p_r Y_{i,\tau}(Q_{r,\tau}^o; V_{r,\tau}^*)] + p_i \times Y_{i,\tau-1}(Q_{\rho(i),\tau-1}^*; V_{R(i),\tau-1}^*) - \sum_{i^* \in I(i)} [p_{i^*} Y_{i^*,\tau-1}(Q_{r,\tau-1}^*; V_{R(i^*),\tau-1}^*)] \right\} / p_i \quad (4)$$

при условиях (2) баланса расходов в i -м узле и на узлах $i^* \in I(i)$. Минимум $Y_{i,\tau}$ для каждого $Q_{\rho(i),\tau}^*$

определяется перебором значений расходов, направляемых на участки, исходящие от i -го узла и поступающие к нижним узлам $i^* \in I(i)$ в данный период $(Q_{r,\tau}^0, Q_{r,\tau}^*)$ и предыдущий $(Q_{\rho(i),\tau-1}^*, Q_{r,\tau-1}^*)$, также объемов предыдущих наполнений $V_{R(i),\tau-1}^*$ и $V_{R(i^*),\tau-1}^*$. Наполнения водоемов к концу данного периода $V_{r,\tau}^*$ и $V_{R(i),\tau}^*$ вычисляются по (3) с учетом расходов водопотребления и отбора на участках $r \in r(i)$. Варианты распределения расходов, не удовлетворяющие (2) и положительности вычисляемых по (3) величин, отбрасываются. Во всех таблицах для каждого варианта расчета даются ссылки на варианты предыдущих таблиц, порождающие данный вариант в данной таблице. В результате перебора узлов от устьевых до начального по периодам с расчетами по таблицам из последней таблицы выбирается минимум $Y_{i0}(Q_{i0}(\tau), V_{R(i0),\tau}^*)$, и по сохранившимся в памяти компьютера ссылкам восстанавливаются все показатели оптимального варианта вододеления для всех элементов речной системы.

На Нижней Волге в настоящее время существует единственное поперечное регулирующее сооружение – вододельитель; “дерево” участков речной сети состоит из одного ствола (Волга–Ахтуба) и двух ветвей дельты; задача наиболее эффективно решается для трех периодов – “сельскохозяйственной полки” весеннего половодья, “рыбной полки” и меженного периода. При определенной схематизации условий выполнены иллюстрирующие метод расчеты для одного периода “рыбной полки” (таблица).

Соотношения расходов вододеления в разных вариантах маловодья различны, что подтверждает существование проблемы вододеления. Изложенный метод может быть детально описан для любого числа регулирующих сооружений с учетом условий заполнения ильменей (самотеком, шлюзами, насосами) с детализацией вплоть до отдельных сооружений и водоемов. Проблема формализуема и для дельты общего вида сети водотоков [17].

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА СОВМЕСТНОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ ВОЛЖСКО-КАМСКИМ КАСКАДОМ ВОДОХРАНИЛИЩ И НИЖНЕЙ ВОЛГОЙ

Компьютерная реализация изложенной задачи вододеления позволит организовать процесс выбора совместного рационального режима пропуска низкого половодья на Нижней Волге и режима регулирования стока Волжско-Камским каскадом водохранилищ (ВКК). Выбор сбросных гидрографов водохранилищ ВКК проводится в

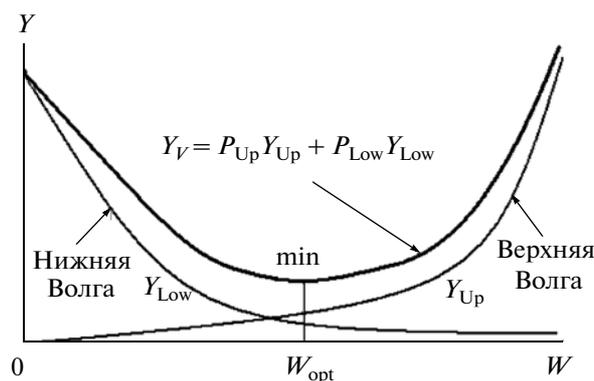


Рис. 3. Схема принятия решений по выбору лучшего приемлемого режима регулирования водными ресурсами Волжско-Камского каскада водохранилищ с учетом интересов Нижней Волги: W – объемная характеристика сбросного гидрографа Волгоградского г/у, Y – условные “ущерб”.

автоматическом режиме с использованием компьютерной системы “Водные ресурсы” [3], имитирующей пропуск речного стока с рассмотрением вариантов управления. Каждый вариант представляет собой набор сбросных гидрографов, в том числе из Волгоградского г/у – можно дать оценку ущербов и качества управления Волгой выше гидроузла за рассматриваемый период. Существует оптимизационная постановка задачи [18].

Аналогично Нижней Волге оценка качества режима управления ВКК представима функцией взвешенных относительных оценок выполнения условий водопользования и водопотребления по отраслям и условий наполнения водохранилищ относительно нормального подпорного уровня НПУ. Гидрограф сбросного расхода Волгоградского г/у описывается совокупностью параметров (на рис. 3 показан лишь объем сброса W). Пусть при сбросном гидрографе Волгоградского г/у W оценка режима ВКК составляет E_{Up} , что отражает качество управления по шкале от 0 до 1, оценка режима Нижней Волги – E_{Low} . Для всей реки $E_V = 1/(p_{Up}/E_{Up} + p_{Low}/E_{Low})$, в “условных ущерббах” $Y_V = p_{Up}Y_{Up} + p_{Low}Y_{Low}$, где экспертные коэффициенты важности частей реки $p_{Up} + p_{Low} = 1$.

На разных водохранилищах Волги при ее регулировании соблюдается приоритет той или иной хозяйственной деятельности: водоснабжение, энергетика, обеспечение водного транспорта и пр. Водоохранилища Средней Волги (Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское), кроме энергетика, обеспечивают водными ресурсами Нижнюю Волгу. Основное значение имеет здесь время

пропуска весеннего половодья и меженный период. Для сбросных расходов Волгоградского г/у в период “сельскохозяйственной полки” норма составляет 25–27 тыс. м³/с продолжительностью 5–7 сут, в период “рыбной полки” норма – от 21 до 24 тыс. м³/с продолжительностью 19–21 сут, приемлемая величина меженного расхода в настоящее время ввиду “посадки” уровней – порядка 5 тыс. м³/с. Практика показывает, что в условиях маловодья, низких прогнозов стока расходы “сельскохозяйственной полки” могут опускаться до 16–18 тыс. м³/с, расход “рыбной полки” – до 14 тыс. м³/с, меженный расход – до 4–4.5 тыс. м³/с. В условиях очень низкого половодья “сельскохозяйственной полка” сбросного гидрографа может отсутствовать полностью. Управление Волгой ведет экспертная Межведомственная оперативная группа (МОГ) [3, 27], за основу принимаемых решений берется средне- и долгосрочный прогнозы притока к створам гидроузлов [19].

Обоснованием режима регулирования стока ВКК с учетом интересов Нижней Волги при заданном прогнозе притока к водохранилищам за один или несколько периодов является следующая формальная процедура. Для заданного прогноза строятся сбросные гидрографы из Волгоградского водохранилища с определением оценок качества регулирования стока Верхней Волги E_{Up} . По этим гидрографам осуществляются расчеты рационального использования водных ресурсов Нижней Волги при начальных наполнениях ильменей, вычисляются оценки качества управления E_{Low} . Оценка E_V всей Волги – функция от параметров гидрографа сброса Волгоградского г/у. Определяются параметры, соответствующие максимуму E_V .

На этапе “грубого” поиска определяются границы объемов попуска на Нижнюю Волгу за периоды полок сбросного гидрографа и межени на основе данных по диапазону объемов притока по долгосрочному прогнозу и начального состояния водохранилищ ВКК. Условия регулирования стока ВКК не позволяют варьировать сбросный гидрограф Волгоградского г/у значительно; возможны вариации соотношения объемов “сельскохозяйственной полки” и “рыбной полки”, их сроков, что соответствует этапу “тонкого” поиска. Форма гидрографа притока к Куйбышевскому водохранилищу определяет границы расходов и сроки, приемлемые для формирования гидрографа Жигулевского г/у. На рис. 3 показана условная по W схема “тонкого” поиска максимума E_V , состоящего в уточнении расходов и сроков

“сельскохозяйственной полки” и “рыбной полки”, расхода межени. Условия дискретности среднесуточных расходов и времени в сутках позволяют найти оптимальное решение прямым перебором вариантов. Прогнозы притока к ВКК уточняются ежемесячно и ежеквартально, поэтому выбор режимов ВКК и Нижней Волги периодически повторяется. Методика выбора совместного решения для ВКК и Нижней Волги требует детализации. Управление водохранилищами ВКК и в настоящее время проводится сообразно интересам Нижней Волги, формализация процесса поможет поиску решений в сложных случаях, повысит доказательность выбора, позволит избежать конфликтных ситуаций.

ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ДЛЯ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

Функции СПВР – это проведение расчетов и выдача результатов для принятия водохозяйственных решений. Важным является ведение в рамках СПВР методических документов, которые подразделяются на инструкции по эксплуатации отдельных программ и комплексов для оператора компьютера, методики по проведению расчетов для пользователя-водохозяйственника и руководства по технологии выработки решений в водохозяйственных ситуациях, присущих Нижней Волге.

В базовом информационном обеспечении СПВР должны учитываться все изменения гидрографии региона, топографии местности, характеристик водных объектов, хозяйственных показателей, параметров сооружений, поступающих загрязняющих веществ и пр. Идентификация параметров речной системы Нижней Волги основана на данных мониторинга водных объектов. Функция оперативного информационного обеспечения состоит в отслеживании текущих гидравлических и качественных показателей водных ресурсов. В области управления режимами СПВР предлагает рациональные режимы вододелиения по гидрологическим показателям стока и осуществляет контроль за выполнением управленческих решений. В аварийных ситуациях высоких половодий гидравлические расчеты определяют прогноз движения воды по руслам и поймам, выявляя участки возможных затоплений, прорывов дамб и пр., предупреждая о возможных чрезвычайных ситуациях. В ситуациях, связанных с аварийным загрязнением реки, осуществляются оперативные расчеты распространения ЗВ. Для мест возможных аварий программный комплекс распространения ЗВ позволяет проводить множественные численные эксперименты, предупреждая о воз-

можных последствиях. Функцией СПВР являются поверочные расчеты при планировании и проектировании водоохраных мероприятий, обвалования территорий, новых трактов водоподачи и т.д. При своем развитии СПВР должна охватывать такие важные для Нижней Волги области расчетов, как режим наносов, русловые процессы, проблемы водопользования, анализ показателей отраслей водопользования.

ВЫВОДЫ

СПВР по Нижней Волге включает в себя большое число разнообразных компонент, программ, функций. Тема СПВР достаточно обширна; в настоящей статье освещены самые главные вопросы ее построения, состав задач и проблем, решение которых без компьютерной поддержки невозможно. Создание и ведение СПВР трудоемко, но эффективно. На пути технического и хозяйственного развития уникального региона Нижней Волги СПВР найдет свое достойное место.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атавин А.А., Васильев О.Ф., Воеводин А.Ф., Шугрин С.М. Численные методы решения одномерных задач гидравлики // Вод. Ресурсы. 1983. № 4. С. 38–47.
2. Байдин С.С., Линберг Ф.Н., Самойлов И.В. Гидрология дельты Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 331 с.
3. Беднарук С.Е. Матушка-Волга // Государственное управление ресурсами. 2007. № 4. С. 10–23.
4. Бердников С.В., Кулыгин В.В., Селютин В.В. Программный комплекс для принятия стратегических решений при управлении водными ресурсами // Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. Краснодар: Авангард плюс, 2010. С. 305–313.
5. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Шаталова К.Ю. Компьютерная гидравлическая модель многоорукавной дельты Волги // Водные ресурсы Волги. Настоящее, будущее, проблемы управления. Астрахань: КаспНИИРХ, 2010. С. 35–40.
6. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005. 318 с.
7. Бреховских В.Ф., Кочарян А.Г., Перекальский В.М. Моделирование влияния городских сточных вод на качество воды в реке // Инженерная экология. 2002. № 4. С. 19–26.
8. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в приливном устье Северной Двины // Метеорология и гидрология. 2002. № 12. С. 86–92.
9. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М., Абрамов Н.Н., Филимонова М.К. Моделирование влияния сброса загрязняющих веществ на качество воды в реке // Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. Краснодар: Авангард плюс, 2010. С. 225–231.
10. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Овчарова А.С. Численные методы решения задачи неустановившегося движения воды устьевых участков рек // Тр. ААНИИ. 1983. Т. 378. С. 23–34.
11. Воронаев Г.В., Иванова Т.Н. Пути повышения эффективности комплексного использования природных ресурсов низовьев Волги // Вод. ресурсы. 1985. № 5. С. 3–10.
12. Гелашвили Д.Б., Краснощёков Г.П., Розенберг Г.С. Опыт достижения устойчивого развития на территории Волжского бассейна // Устойчивое развитие. Наука и практика. 2003. № 1. С. 19–31.
13. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
14. Ларичев О.И., Петровский А.В. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. М.: ВИНТИ, 1987. Т. 21. С. 131–164.
15. Левит-Гуревич Л.К. Метод динамического программирования для выбора рационального водораспределения в дельте реки // Изв. Самарского НЦ РАН. 2010. Т. 12 (33). № 1 (4). С. 950–956.
16. Левит-Гуревич Л.К. Управление водными ресурсами водохранилищ // Водные ресурсы и качество вод. Состояние и проблемы управления / Под ред. Данилова-Данильяна В.И., Пряжинской В.Г. М.: ИВП РАН, 2010. С. 364–391.
17. Левит-Гуревич Л.К., Пряжинская В.Г., Сотникова Л.Ф. Системы поддержки водохозяйственных решений // Водные ресурсы и качество вод. Состояние и проблемы управления / Под ред. Данилова-Данильяна В.И., Пряжинской В.Г. М.: ИВП РАН, 2010. С. 111–120.
18. Левит-Гуревич Л.К., Ярошевский Д.М. Схема динамического программирования с многомерной индикацией шагов // Автоматика и телемеханика. 2009. № 9. С. 23–40.
19. Мотовилов Ю.Г. Информационно-моделирующий комплекс ЕСОМАГ моделирования речных бассейнов // Докл. VI Всерос. гидрол. съезда. Секция 5. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. С. 139–140.
20. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984. 274 с.
21. Полонский В.Ф., Михайлов В.Н., Кирьянов С.В. Устьевая область Волги: Гидролого-морфометрические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 1998. 278 с.
22. Полянинова А.А. Кормовая продуктивность // Научные основы устойчивого рыболовства и регио-

- нального распределения промысловых объектов Каспийского моря. М.: ВНИРО, 1998. С. 30–43.
23. *Раткович Д.Я.* Актуальные проблемы водообеспечения. М.: Наука, 2003. 352 с.
24. *Раткович Д.Я., Болгов М.В.* Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. М.: ИВП РАН, 1997. 262 с.
25. Рыбохозяйственные исследования на Каспии / Под ред. Карпюк М.И. Астрахань: КаспНИИРХ, 2005. 615 с.
26. *Сокольский А.Ф., Пилипенко В.Н., Сокольская Е. А.* Эколого-биологические основы рационального природопользования в западных подstepных ильменах дельты Волги. Астрахань: Астраханский ун-т, 2005. 126 с.
27. Управление водными ресурсами. М.: АМА-ПРЕСС, 2008. 288 с.
28. *Цветков В.Я.* Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998. 287 с.
29. *Druzdzal M.J., Flynn R.R.* Decision Support Systems // Encyclopedia of Library and Information Science / A. Kent. N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 1999.