

УДК 556.5.072

## ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ<sup>1</sup>

© 2020 г. Ю. Г. Мотовилов<sup>a, \*</sup>, С. Д. Голосов<sup>b</sup>, Ю. С. Даценко<sup>a, c</sup>,  
И. С. Зверев<sup>b</sup>, В. В. Пуклаков<sup>c</sup>, Т. Б. Фащевская<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>b</sup>Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

<sup>c</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
географический факультет, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: motol49@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.02.2020 г.

После доработки 27.02.2020 г.

Принята к публикации 13.03.2020 г.

Для информационной поддержки принятия управленческих решений в области рационального использования, охраны и восстановления экосистем водохранилищ разработан Информационно-моделирующий комплекс, предусматривающий последовательную реализацию трех математических гидроэкологических моделей системы “Водосбор Нижнекамского водохранилища–Нижнекамское водохранилище–Куйбышевское водохранилище”. Комплекс моделей – эффективный инструмент при исследовании реакции экологического состояния водохранилищ на природные изменения и антропогенные воздействия. Использование комплекса в качестве инструмента экологического прогноза или экспертной системы в рамках сценарного моделирования природных процессов – наиболее перспективный путь решения задач управления качеством воды и продуктивностью водохранилищ.

**Ключевые слова:** речной бассейн, водохранилища, моделирование, загрязняющие вещества, качество воды.

**DOI:** 10.31857/S0321059620050132

### ВВЕДЕНИЕ

Программа “Оздоровление Волги” направлена на разработку и реализацию мероприятий по сохранению и улучшению качества воды и гидроэкологического состояния водохранилищ Волжско-Камского каскада (ВКК). Чрезвычайно сложные многообразные процессы формирования количества и качества воды и функционирования экосистем водохранилищ определяются непрерывным взаимодействием водного объекта – водохранилища и его водосборной территории. Высокая хозяйственная освоенность водосборов волжских водохранилищ способствует росту антропогенной нагрузки на водохранилища загрязняющими веществами, следствием которого является ухудшение состояния экосистем и качества воды. При решении задач регулирования и управления качеством воды в бассейне Волги необходимым этапом следует считать обоснован-

ную оценку реакции экосистем водохранилищ на внешнюю нагрузку.

Научно-обоснованное прогнозирование экологической реакции на антропогенное воздействие в системе водохранилищ ВКК, оценка эффективности различных управленческих решений в области рационального использования, охраны и восстановления экосистем водохранилищ невозможны без создания математических моделей качества воды как на водосборе, так и в самом водохранилище. Использование таких моделей в качестве инструмента экологического прогноза или экспертной системы в рамках сценарного моделирования природных процессов – наиболее перспективный путь решения задач управления качеством воды и продуктивностью водохранилищ. При выработке стратегии управления качеством воды математические модели позволяют учесть взаимообусловленность связей между компонентами экосистемы и оценить направленность изменений в ее поведении в зависимости от характера и интенсивности внешних нагрузок.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (проект № 17-7730006).

Разработанный Информационно-моделирующий комплекс (ИМК) предусматривает последовательную реализацию трех математических моделей системы Водосбор Нижнекамского водохранилища—Нижнекамское водохранилище—Куйбышевское водохранилище с целью оценки влияния водосбора крупнейшего притока в Нижнекамское водохранилище — р. Белой на трансформацию качества воды и состояние экосистем водохранилищ Волги на примере высокопроточного Нижнекамского и крупнейшего в каскаде Куйбышевского водохранилищ. Эта система может рассматриваться как прототип экспертного инструмента для определения целесообразности и эффективности управленческих решений, направленных на сохранение и улучшение качества воды исследуемых водных объектов.

### МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СТОКА НА ВОДОСБОРЕ НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ECOMAG

#### *Структура модели*

В настоящее время для крупнейших речных бассейнов России построена и доведена до технологического уровня использования пространственно-распределенная физико-математическая модель ECOMAG (ECological Model for Applied Geophysics) [9, 16, 23], которая позволяет воспроизводить и прогнозировать динамику полей гидрологических и гидрохимических переменных (речного стока, характеристик снежного покрова, влажности почвы, загрязнения воды и др.) с высоким пространственно-временным разрешением и с достаточной, по принятым критериям, точностью; модель, которая опирается при этом на данные стандартного отечественного гидрометеорологического и гидрохимического мониторинга. Это положение приобретает особую значимость ввиду ограниченности возможностей применения для бассейнов России развитых зарубежных гидрологических моделей, поскольку последние в большинстве случаев разрабатывались для отличающихся от российских условий формирования речного стока и опирались на отличающуюся по составу и точности исходную информацию. В работах [11, 24] на примере речных бассейнов, расположенных в разных физико-географических условиях, рассмотрены приложения модели к актуальным задачам гидрологии речных бассейнов, включая оценку изменений водного и гидрохимического режима под влиянием изменений климата и антропогенной нагрузки, управления действующими водноресурсными системами, эффективности противопаводковых мероприятий и др., а также к задачам оперативных гидрологических прогнозов.

Модель ECOMAG состоит из двух основных блоков: гидрологической подмодели формирования стока и гидрохимической подмодели миграции и трансформации загрязняющих веществ (ЗВ) в речных бассейнах. Первая подмодель описывает процессы гидрологического цикла суши: формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвогрунтов, инфильтрацию талых и дождевых вод в почву, испарение, динамику влажности почвы, формирование поверхностного, подповерхностного, грунтового и речного стока. Уравнения, алгоритмы и результаты испытаний этого блока модели на примере крупнейших речных бассейнов северного полушария (Волги, Лены, Амура, Маккензи и др.), расположенных в различных географических зонах с разными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов, описаны во многих работах [6, 9–11].

Гидрохимическая подмодель, ориентированная на описание закономерностей миграции и трансформации ЗВ в речных бассейнах, учитывает процессы их аккумуляции на поверхности речного бассейна, растворение талыми и дождевыми водами, просачивание растворенных ЗВ в почву, взаимодействие с почвенным раствором и твердой фазой почвы [16, 23, 24]. Интенсивность поступления ЗВ в поверхностный поток рассчитывается как линейная функция от разности их концентраций в почве и в водном потоке. При наличии на поверхности бассейна ЗВ, выпадающих из атмосферы в виде сухого осадка, процесс их растворения жидкими осадками и талыми водами описан линейной зависимостью потока растворенного вещества от разности максимально возможной и текущей концентрации в потоке. Процесс сорбции-десорбции химических веществ почвой описан линейной изотермой сорбции Фрейндлиха, которая устанавливает связь между количеством сорбированного вещества и его концентрацией в растворе. Для биогенных элементов (азот, фосфор) учитываются процессы биохимических циклов в компонентах геосистемы речного бассейна.

Транспорт растворенных ЗВ в речном бассейне зависит от интенсивности гидрологических процессов и осуществляется поверхностным, подповерхностным, грунтовым и речным стоком. Поэтому гидрологические характеристики, определяемые в гидрологическом модуле, используются как входы для гидрохимической подмодели.

При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется нерегулярной сеткой на отдельные элементарные водосборы с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети. Моделирование гидрологических и гидрохимических процессов на каждом элементарном

водосборе выполняется для четырех уровней: в зоне формирования поверхностного стока, для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. Схема заканчивается рассмотрением процессов трансформации в речной сети.

Для удобства проведения расчетов в рамках различных проектов информационной поддержки при управлении водными ресурсами, прогнозировании водного и гидрохимического режима, а также для научных исследований разработан компьютерный технологический комплекс (КТК) ЕСОМАГ. Комплекс включает в себя расчетный модуль физико-математической модели ЕСОМАГ и средства информационной и технологической поддержки работы этого модуля: тематические цифровые электронные карты, технологию автоматизированного разбиения водосборной площади на элементарные водосборы и схематизации речной сети, базы данных характеристик подстилающей поверхности, базы данных гидрометеорологической, гидрохимической и водохозяйственной информации, средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации и управляющую оболочку. Управляющая оболочка позволяет связать информацию ГИС для рассматриваемой территории с информацией баз данных, сконфигурировать необходимый вариант расчета, запустить модель на счет и отобразить результаты расчетов на экране компьютера в форме различных графиков и схематических карт территории, включающих картографическую основу, расчетные гидрологические карты и карты загрязнения речного бассейна и русловой сети. Имеющиеся в КТК информационные ресурсы по объему и пространственному покрытию территории России достаточны для построения региональных гидрологических моделей и проведения расчетов для любых крупных речных бассейнов России. КТК ЕСОМАГ предназначен для широкого круга гидрологических и природоохранных прикладных задач диагностики и прогнозирования.

Модельная схематизация водосборной площади и речной сети на водосборе выполняется с использованием КТК ЕСОМАГ на основе цифровых тематических карт региона: цифровой модели рельефа, гидрографической сети, почв и ландшафтов. В автоматическом режиме строится модельная древообразная структура речной сети и выделяются линии водоразделов — границы расчетных (элементарных) водосборов. В модельном комплексе ЕСОМАГ каждому расчетному элементу назначаются соответствующие модельные параметры (почв, растительности и т.д.).

### *Адаптация КТК ЕСОМАГ на водосборе Нижнекамского водохранилища*

Общая площадь водосбора р. Камы в створе Нижнекамского гидроузла составляет 366 тыс. км<sup>2</sup>, а частный водосбор Нижнекамского водохранилища (НКВ) между Нижнекамским и Воткинским гидроузлами, расположенный в Южно-Уральском регионе России, имеет площадь 186 тыс. км<sup>2</sup>. Водосбор характеризуется высокими концентрациями тяжелых металлов (ТМ) в природных водах из-за значительного содержания рудообразующих элементов в почвах и горных породах.

Схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне НКВ, задание большинства физически обоснованных параметров модели выполнялись на основе тематических карт региона с использованием КТК ЕСОМАГ.

Расчеты по модели ЕСОМАГ проводятся по метеорологическим данным с суточным шагом по времени. Поля метеоданных (суточных осадков, среднесуточной температуры и дефицита влажности воздуха) на территорию бассейна — вход в модель. Модель в непрерывном режиме рассчитывает поля снежного покрова, снеготаяния, увлажнения и промерзания почвы, испарения, генетических составляющих речного стока. Гидрографы стока на гидропостях, притока воды к водохранилищам за предшествующие периоды, а также поля снежного покрова по данным снего-съемок, поля влажности и глубины промерзания почвы по данным измерений на агрометеорологических станциях используются в модели для калибровки ее параметров и проверки точности гидрологического блока модели.

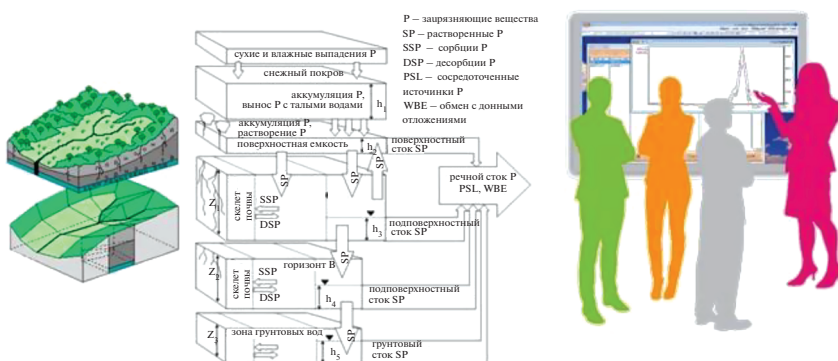
В гидрохимической подмодели начальные условия по концентрации ЗВ в почвах водосбора НКВ задавались на основе приведенных в Атласе [19] карт содержания химических элементов в пахотном слое почв. Содержание ЗВ в атмосферных осадках и в напорных грунтовых водах, осуществляющих подпитку верховодки в зоне аэрации почвогрунтов, задавалось на основе региональных справочников. В качестве информации о точечных антропогенных источниках загрязнения речных вод использовались данные о сбросах ЗВ со сточными водами в населенных пунктах в бассейне р. Белой на основе форм статистической отчетности 2-ТП (водхоз). Для калибровки параметров и проверки гидрохимической подмодели используются многолетние данные о динамике содержания ЗВ в речных водах на 34-х постах на р. Белой и ее притоках, полученные службами Росгидромета (рис. 1).

На основании численных экспериментов по модели ЕСОМАГ для водосбора Нижнекамского водохранилища [22, 24] сделано следующее:

Точечные (1) и диффузные (2) источники загрязнения водных объектов



Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG



Проверка в бассейне Нинекамского водохранилища

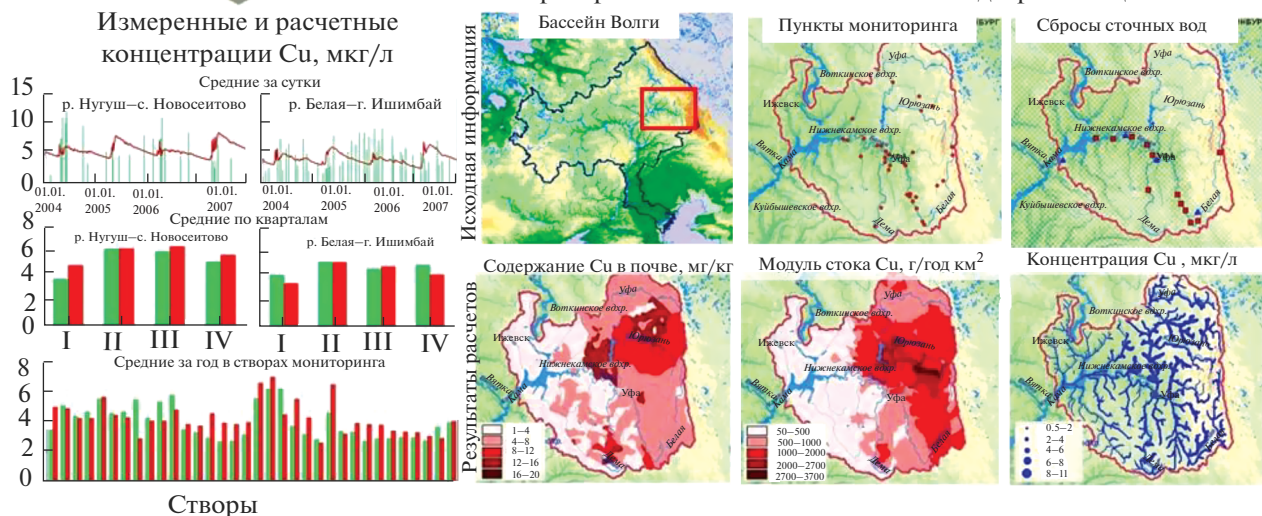


Рис. 1. Схематическое представление структуры гидрохимического блока модели, расположения пунктов гидрохимического мониторинга и видов представления расчетной гидрохимической информации.

проведена оценка вклада природных и антропогенных составляющих в формирование гидрохимического стока ЗВ;

выполнены расчеты полей и построены карты среднееголетних модулей водного стока и химического стока ЗВ;

построены карты среднееголетних концентраций ЗВ в водотоках бассейна НКВ, в том числе на участках рек, не охваченных гидрохимическими наблюдениями;

проведены оценки вклада сточных вод в загрязнение речных вод при различных объемах точечных сбросов ЗВ на водосборе.

Результаты расчетов гидрографов стока и динамики ЗВ по модели ECOMAG в устье р. Белой, а также притока к выделенным отсекам НКВ – входы в модель ГМВ-МГУ.

### ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ В НИЖНЕКАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (ГМВ-МГУ)

Нижнекамское водохранилище создано в 1978 г. в долине р. Камы путем перекрытия реки (1 ноября 1978 г.) и наполнения в 1979 г. до временной отметки 62.0 мБС (проектная отметка 68.0 мБС). Полный объем водохранилища при отметке 62.0 мБС составляет 2.9 км<sup>3</sup>, площадь водного зеркала – 1.08 тыс. км<sup>2</sup>. Максимальная ширина водохранилища равна 15, средняя – 4 км. Длина водохранилища – 185 км.

Нижнекамское водохранилище представляет собой сложный водоем как с морфологической, так и с гидродинамической и экологической точек зрения. Основная часть притока воды в водохранилище поступает по р. Каме (64%) из Воткинского водохранилища и по р. Белой (31%), остальная часть – боковой приток малых рек водосбора. Водоохранилище эксплуатируется в усло-

виях ежегодного недобора уровня воды на 5–6 м ниже проектной отметки НПУ, в результате чего площадь мелководий с глубинами до 2 м достигает в нем до 50% общей площади водохранилища и неблагоприятно сказывается на качестве воды.

### *Идеология и структура модели*

Разработанная на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ гидрологическая модель водохранилищ (ГМВ-МГУ) представляет собой боксовую квазидвумерную продольно-вертикальную модель водохранилища, включающую в себя блоки расчета тепло-массообмена (ТМО) и характеристик качества воды и продуктивности водохранилища (экологический блок) [3, 13, 25].

Модель основана на следующих требованиях к алгоритмам расчета:

1) схематизация водохранилища должна учитывать его морфологическое строение и гидротехнические особенности водозаборов гидроузлов;

2) простота алгоритма численного решения уравнений;

3) адекватность воспроизведения и по возможности наиболее полный охват основных процессов, определяющих гидрологический режим водохранилища;

4) расчеты должны воспроизводить вертикальную структуру водной массы отдельных плесов-отсеков водохранилища с шагом по глубине 1 м и ее изменение во времени с шагом 1 сут в течение всего годового цикла;

5) описание гидрометеорологических процессов в модели должно использовать методики, рекомендованные для гидрологических и водохозяйственных расчетов при проектировании водохранилищ [14];

6) модельные расчеты должны базироваться на стандартной гидрометеорологической информации Росгидромета и сети мониторинга загрязнения окружающей среды.

Нижнекамское водохранилище схематизировано в модели в виде четырех лопастей, разделенных на 11 плесов-отсеков (рис. 2). Каждая лопасть делится на расчетные отсеки с учетом их гидродинамических и морфометрических особенностей. Все отсеки разбиваются по вертикали на горизонтальные боксы (рис. 2б). Батиграфические кривые и морфометрические характеристики отсеков получены путем планиметрирования лоцманских карт рек Камы и Белой [1, 2] с коррекцией полученных результатов по таблицам площадей и статических объемов водохранилища [12]. В пределах каждого бокса водная масса предполагается однородной. Толщина боксов постоянна — 1 м, за исключением поверхностного бокса, толщина которого меняется в пределах 0.5–1.5 м.

При последовательном выполнении расчетов от отсека к отсеку начиная с верховьев водоема к каждому из них применим алгоритм классической одномерной (по вертикали) модели, детально изложенный в [20]. Изменения характеристик водной массы в боксе описываются на основе балансовых уравнений, описывающих неразрывность водной среды и закон сохранения вещества и энергии в каждом боксе отсека при условии полного смешения притока с содержимым расчетного бокса. Уравнение состояния воды представлено в виде зависимости ее плотности от температуры и электропроводности для пресной воды гидрокарбонатного и сульфатного классов [3]. Сток воды из водохранилища задается через разнуровневые водосбросы с учетом селективности водозабора по зависимостям Бохена и Грейса [17].

Алгоритм модели структурирован в виде четырех блоков (рис. 3).

Расчет по модели выполняется на основе метода суперпозиции в следующей последовательности для каждого расчетного шага по времени:

оценка трансформации метеоданных над водной поверхностью отсеков;

водный баланс и новый уровень воды в водохранилище;

внутримассовая трансформация характеристик качества воды в боксах отсеков;

тепловой баланс и динамика снежно-ледяного покрова;

эффективное ветровое перемешивание;

вынужденная конвекция в виде циркуляции Ленгмюра;

свободно-конвективное перемешивание;

водообмен в результате стоковых течений;

динамическое перемешивание;

водообмен в результате плотностных, ветровых и компенсационных течений;

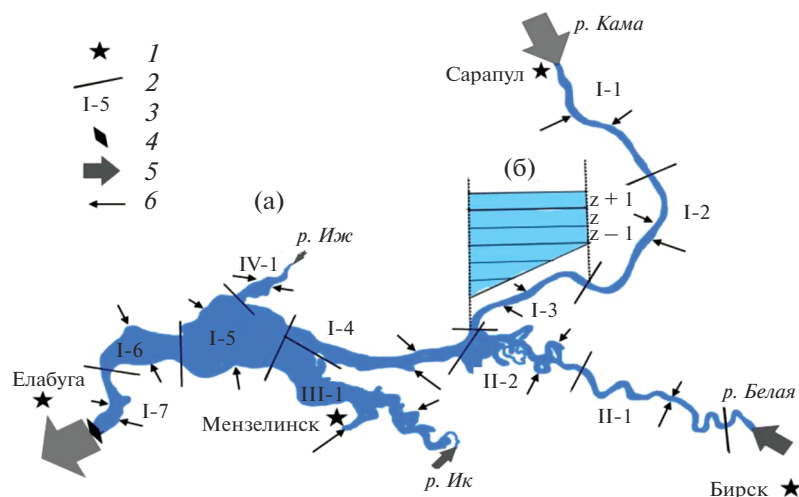
формирование файлов результатов расчета.

В конце каждого расчетного шага осуществляется контроль баланса вещества и энергии в отсеках.

### *Адаптация модели для Нижнекамского водохранилища*

Все исходные данные разделены в модели на 3 группы: файлы базовых и начальных условий и файл текущей информации. В базовый файл входит информация о моделируемом объекте, его схематизации, морфометрии выделенных отсеков, водосборах притоков водоема, частных водосборах отсеков, метеостанциях и их привязке к отсекам, параметрах водозаборных сооружений, константах химических и биологических реакций, гидрохимические характеристики грунто-





**Рис. 2.** Схематизация Нижнекамского водохранилища: а — деление водохранилища на отсеки; б — деление отсека на расчетные боксы. 1 — метеостанции, 2 — границы выделенных отсеков, 3 — номера расчетных лопастей-отсеков, 4 — Нижнекамская ГЭС, 5 — приток-сток основных рек, 6 — боковой приток к отсекам.

вых вод и атмосферных осадков в регионе расположения водохранилища.

В файле начальных условий приводится информация о состоянии водной поверхности (наличие ледостава или его отсутствие), о вертикальном распределении гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик воды в каждом отсеке на начало расчета. Расчеты гидрологического режима НКВ проводятся для многолетнего периода.

В файле текущей информации на каждые расчетные сутки задаются данные о среднесуточных метеоусловиях на четырех метеостанциях (в городах Елабуге, Сарапуле, Бирске и Мензелинске), расположенных в непосредственной близости к водохранилищу (рис. 2). Приток воды к водохранилищу по основным рекам и с боковых водосборов отсеков задаются по результатам расчетов модели формирования стока ЕСОМАГ.

Гидрологическая информация сопровождается данными о характеристиках качества воды (ХКВ) каждого потока, поступающего в расчетный отсек. ХКВ р. Камы задавались по результатам сплайновой интерполяции их среднемесячных значений, полученных по наблюдениям в нижнем бьефе Воткинского гидроузла в 1986–2001 гг. Для задания ХКВ боковой приточности к отсекам и основных рек использовались результаты расчетов химического состава воды по модели формирования стока на водосборе водохранилища.

#### Расчетная информация

В гидрологическом блоке модели рассчитывается трансформация метеоэлементов над водной

поверхностью, водный баланс и изменение уровня воды в водохранилище, теплообмен с атмосферой и грунтами дна, динамика снежно-ледяного покрова и распределение поступающей солнечной радиации по глубине расчетных отсеков. Расчеты выполняются на основе методик, подробно изложенных в [14].

В экологическом блоке выполняется расчет трансформации неконсервативных характеристик, концентрации которых изменяются под влиянием комплекса физико-химических, химических и биохимических процессов. В алгоритме блока предусмотрен расчет следующих ХКВ: биомассы трех групп фитопланктона (холоднолюбивых диатомовых, синезеленых и прочих видов), растворенного кислорода, содержания фосфатного, аммонийного и нитратного ионов, нестойкого (легко окисляемого) и стойкого органического вещества (ОВ), зоопланктона, икhtiофауны, детрита, концентрации минеральной и органической взвеси. Расчеты проводятся по уравнениям баланса массы в соответствии с концептуальными схемами взаимосвязей этих переменных в водной экосистеме [20].

Из биогенных элементов моделируется режим наиболее важных для развития фитопланктона: фосфора, азота и кремния. Фосфор представлен в виде фосфат-ионов ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), азот — в виде ионов аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), нитритов и нитратов ( $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ). В питании водорослей аммонийная форма рассматривается как наиболее предпочтительная [4].

При расчете содержания в боксах модели биогенных элементов учитываются следующие про-

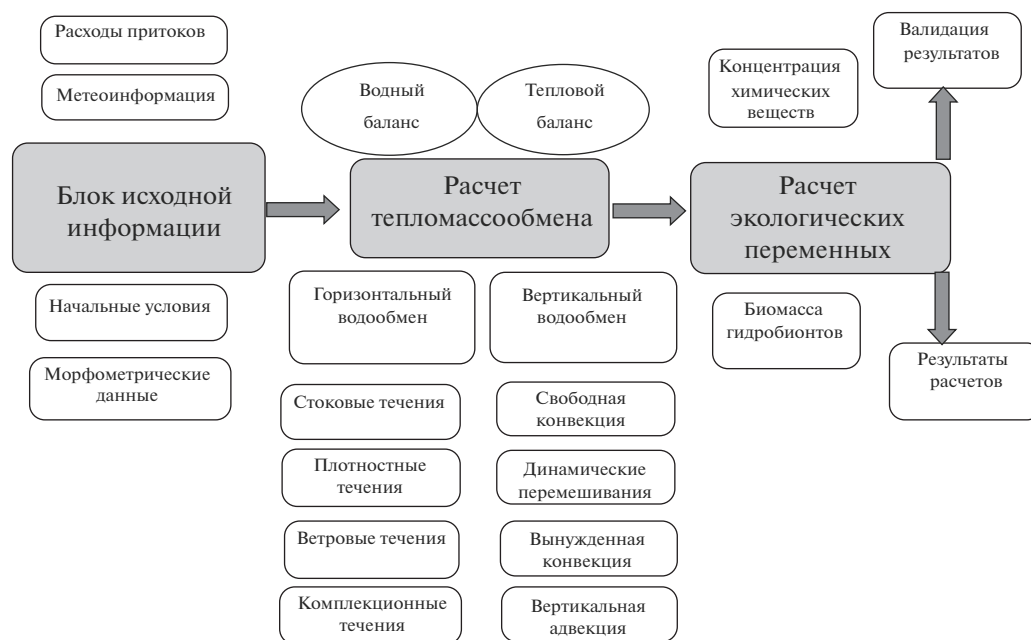


Рис. 3. Блок-схема алгоритма ГМВ-МГУ.

цессы: их потребление фитопланктоном, разложение детрита, нестойкого и стойкого ОВ, дыхание фитопланктона, зоопланктона и рыб, вынос из донных отложений при анаэробных условиях, нитрификация и денитрификация, сорбция и соосаждение. Процессы сорбции описываются классической кинетикой Ленгмюра. Изменение концентрации кремния в водоеме определяется продуктивностью диатомовых водорослей.

Из других элементов, связанных с биохимическими процессами в водоеме, моделируется режим марганца, железа, серы, неорганического углерода, диоксида углерода и ионов водорода.

Минеральные азот и фосфор накапливаются в донных отложениях в результате разложения детрита и седиментации взвеси и удаляются из них в анаэробных условиях.

Растворенное в воде ОВ представлено в виде биохимически стойкого и биохимически нестойкого ОВ, различающихся различной скоростью их разложения.

#### Результаты моделирования

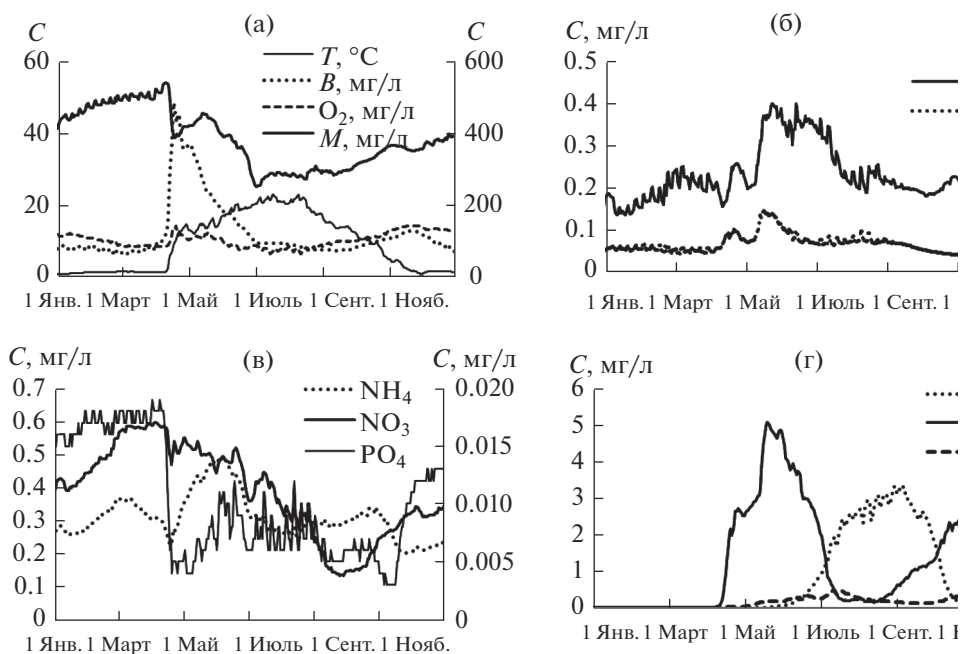
Модель была использована для диагностических, прогностических и сценарных гидроэкологических расчетов. Валидация ГМВ-МГУ проводилась по результатам расчетов гидрологического режима многих водохранилищ, но наиболее детально она была выполнена на подмосковных водохранилищах, количество данных наблюдений на которых позволяло получить оценки качества модельных расчетов по статистическим критери-

ям. Для большинства анализируемых ХКВ качество их расчета соответствовало оценке “удовлетворительно” [3].

Результаты расчета всех ХКВ выдавались на каждые сутки в виде их вертикального распределения в отсеках по продольной оси лопастей водоема. Кроме того, модель позволяет рассчитывать значения ХКВ в нижнем бьефе водохранилища, что чрезвычайно важно для оценки влияния водохранилища на трансформацию качества воды в нем. В качестве примера на рис. 4 показан ход изменения значений ХКВ в нижнем бьефе Нижнекамского гидроузла в 2012 г.

### 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Куйбышевское водохранилище – самое крупное на р. Волге, третье в мире по площади и крупнейшее в Европе. Оно создано в 1955 г. после завершения строительства плотины Жигулёвской ГЭС, перегородившей долину Волги у г. Тольятти. Длина водохранилища по р. Волге – 467 км и р. Каме – 280 км. Максимальная ширина ~26 км (в районе Камского Устья), средняя глубина 9,3, наибольшая – 41 м (плотина Волжской ГЭС). Общая протяженность береговой линии – 2604 км. Площадь водного зеркала – 6,45 тыс. км<sup>2</sup>. Основное назначение водохранилища – сезонное регулирование стока, выработка электроэнергии,



**Рис. 4.** Изменения концентраций ( $C$ ) ХКВ в нижнем бьефе Нижнекамского гидроузла в 2012 г.: а – температура ( $T$ ), минерализация ( $M$ ), содержание взвеси ( $B$ ) и растворенного кислорода ( $O_2$ ); б – железо ( $Fe$ ) и марганец ( $Mn$ ); в – аммоний ( $NH_4$ ), нитраты ( $NO_3$ ) и фосфаты ( $PO_4$ ); г – синезеленые ( $C3$ ), диатомовые ( $D$ ) и прочие ( $Pr$ ) виды фитопланктона.

улучшение судоходства, водоснабжение, ирригация.

#### Структура модели

Ввиду большой площади акватории Куйбышевского водохранилища, наличия в нем участков с сильной изрезанностью береговой линии гидрофизические и химико-биологические процессы в нем имеют ярко выраженную пространственно-временную неоднородность. Для корректного воспроизведения процессов в экосистеме Куйбышевского водохранилища, включая процессы формирования биогенной нагрузки, необходимо применение 3D-подхода (трехмерного), который изначально получил применение в метеорологии и океанологии, а затем и в гидрологии. Подробное описание истории применения 3D-подхода в моделировании разнотипных пресноводных водоемов приведено в монографии [8].

В последние годы большое распространение (по крайней мере, в Российской Федерации) получила математическая модель гидродинамики внутреннего моря (МГВМ), разработанная в Институте вычислительной математики РАН [5]. Модель прошла успешную апробацию при моделировании термогидродинамического режима Каспийского моря. Для дискретизации уравне-

ний гидродинамики здесь применяется метод конечных объемов (МКО). Отправная точка МКО – интегральная формулировка законов сохранения массы, импульса, энергии и др. Балансовые соотношения записываются для небольшого контрольного объема; их дискретный аналог получается суммированием по всем граням выделенного объема потоков массы, импульса. Поскольку интегральная формулировка законов сохранения не накладывает ограничений на форму контрольного объема, МКО пригоден для дискретизации уравнений гидродинамики как на структурированных, так и на неструктурированных сетках с различной формой ячеек, что, в принципе, полностью решает проблему сложной геометрии расчетной области [15].

Циркуляция морских вод в бассейне произвольной геометрии описывается трехмерными уравнениями термогидродинамики. Поверхность раздела воздух–вода свободная, воспроизводятся пространственная изменчивость топографии поверхности моря и изменчивость среднего уровня моря. Взаимодействие атмосферы и моря описывается через потоки импульса, тепла и влаги. При возникновении условий, благоприятных для формирования льда, включается модель льда, описывающая термодинамические процессы (изменение температуры, намерзание, таяние) во льду. В модели явным образом описываются по-



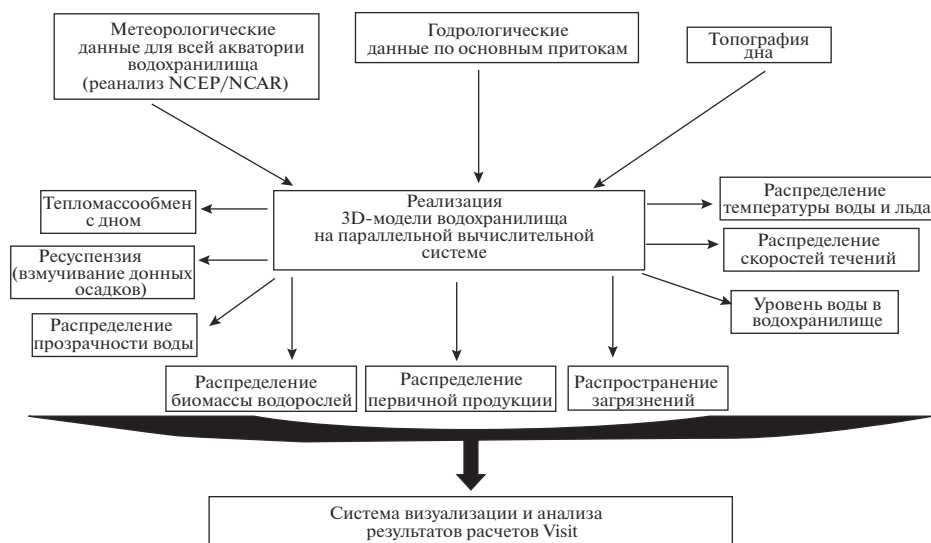


Рис. 5. Блок-схема модифицированной модели.

токи воды и ее свойств (соленость, теплосодержание) через боковые границы (сток рек и обмен через проливы) и поверхность раздела воздух–вода (испарение, осадки). В случае моделирования областей с открытыми границами на них ставятся условия излучения.

Термодинамическое состояние внутреннего моря описывается трехмерными функциями температуры, солености, компонент скорости течений, а также двухмерной функцией высоты поверхности уровня внутреннего моря. Модель включает в себя трехмерные полные уравнения геофизической гидротермодинамики.

#### *Адаптация модели для Куйбышевского водохранилища*

Модель МГВМ адаптирована для использования в условиях пресноводного водоема Куйбышевского водохранилища. В частности, для учета наличия у пресной воды температуры максимальной плотности уравнение состояния морской воды заменено на квадратичное уравнение состояния слабоминерализованной воды [21]. Выполнены соответствующие работы по построению расчетной сетки для Куйбышевского водохранилища, параметры которой составили  $170 \times 302$  узла по горизонтали и 8 уровней по вертикали. Для описания химико-биологических процессов гидротермодинамическая часть модели была дополнена уравнениями, описывающими сезонную динамику фитопланктона, седиментацию ОБ на поверхность донных отложений, захоронение и минерализацию ОБ, механическую ресуспензию верхнего слоя донных осадков и т.д. На рис. 5

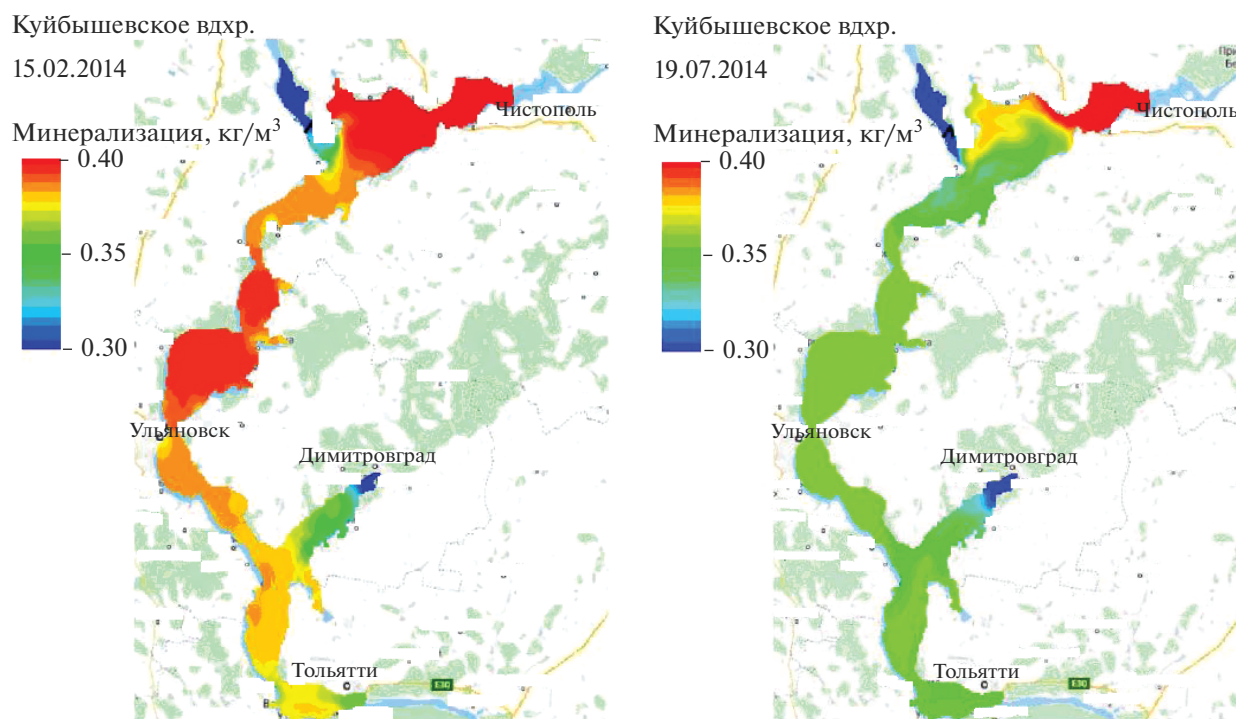
представлена блок-схема модифицированной модели, которая использовалась для расчетов гидрофизических и химико-биологических параметров Куйбышевского водохранилища.

#### *Результаты моделирования*

С целью проверки адекватности (непротиворечивости) модели реальным процессам выполнен ряд численных экспериментов по расчету гидротермодинамических и химико-биологических характеристик Куйбышевского водохранилища за период с 2012 по 2015 г.

В качестве примера моделирования растворенной консервативной примеси выбрана общая минерализация. Химический состав водных масс Куйбышевского водохранилища на 90–95% определяется составом вод двух основных его притоков – рек Волги и Камы [7]. При этом общая минерализация вод притоков различается почти в два раза: средняя минерализация в Каме составляет 0.42, в Волге – 0.24 кг/м<sup>3</sup>. Именно спецификой смешения вод этих притоков в различные сезоны года и определяется общая минерализация во всем водохранилище.

На рис. 6 представлены результаты моделирования пространственного распределения общей минерализации в Куйбышевском водохранилище в период ледостава и в период открытой воды. Из рисунков видно, что распределения минерализации в водохранилище в эти периоды радикально различаются, что обусловлено факторами, влияющими на процесс смешения вод Волги и Камы в различные сезоны года. В зимний пери-



**Рис. 6.** Пространственное распределение общей минерализации в Куйбышевском водохранилище в зимний период (слева) и в середине лета.

од в отсутствие прямого воздействия атмосферных процессов — в основном ветрового перемешивания водных масс — распространение вод притоков обусловлено главным образом бароклинными факторами. При этом смешение водных масс происходит на протяжении всего Волжско-Камского плеса до значений минерализации  $0.37\text{--}0.38\text{ кг/м}^3$ . В летний период картина меняется. Под воздействием интенсивного ветрового перемешивания воды Волги и Камы перемешиваются по всей глубине водоема до минерализации, близкой к  $0.35\text{ кг/м}^3$ . В дальнейшем эта величина общей минерализации сохраняется на всем протяжении водохранилища вплоть до Приплотинного плеса.

На рис. 7 представлены результаты моделирования пространственного распределения общей биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в течение вегетационного периода 2014 г. Распределение концентраций водорослей в начале сезона вегетации определяется в основном температурными различиями в разных частях акватории водохранилища. Так, максимальные величины биомассы наблюдаются в устьях притоков и вдоль береговых мелководий, где после окончания периода ледостава температура воды выше. В середине лета отчетливо просматриваются максимальные ве-

личины биомассы водорослей в мелководных, хорошо прогретых плесах водохранилища. Дело в том, что Куйбышевское водохранилище — эвтрофный водоем, поэтому при отсутствии лимитирования развития фитопланктона биогенными элементами особое влияние оказывают другие факторы, включая температуру воды. В частности, это относится к Черемшанскому заливу, который считается наиболее продуктивным районом водохранилища [18].

## ВЫВОДЫ

Для информационной поддержки принятия управленческих решений в области рационального использования, охраны и восстановления экосистем водохранилищ разработан Информационно-моделирующий комплекс, предусматривающий последовательную реализацию трех математических моделей системы Водосбор Нижнекамского водохранилища—Нижнекамское водохранилище—Куйбышевское водохранилище. Расчет в системе ведется последовательно, начиная с модели водосбора, в качестве которой используется физико-математическая модель формирования стока ЕСОМАГ. Входная информация этой модели — характеристики водосбора Нижнекамского водохранилища, метеоинформация и характеристики антропогенной нагрузки на территорию водосбора. Результаты модельных

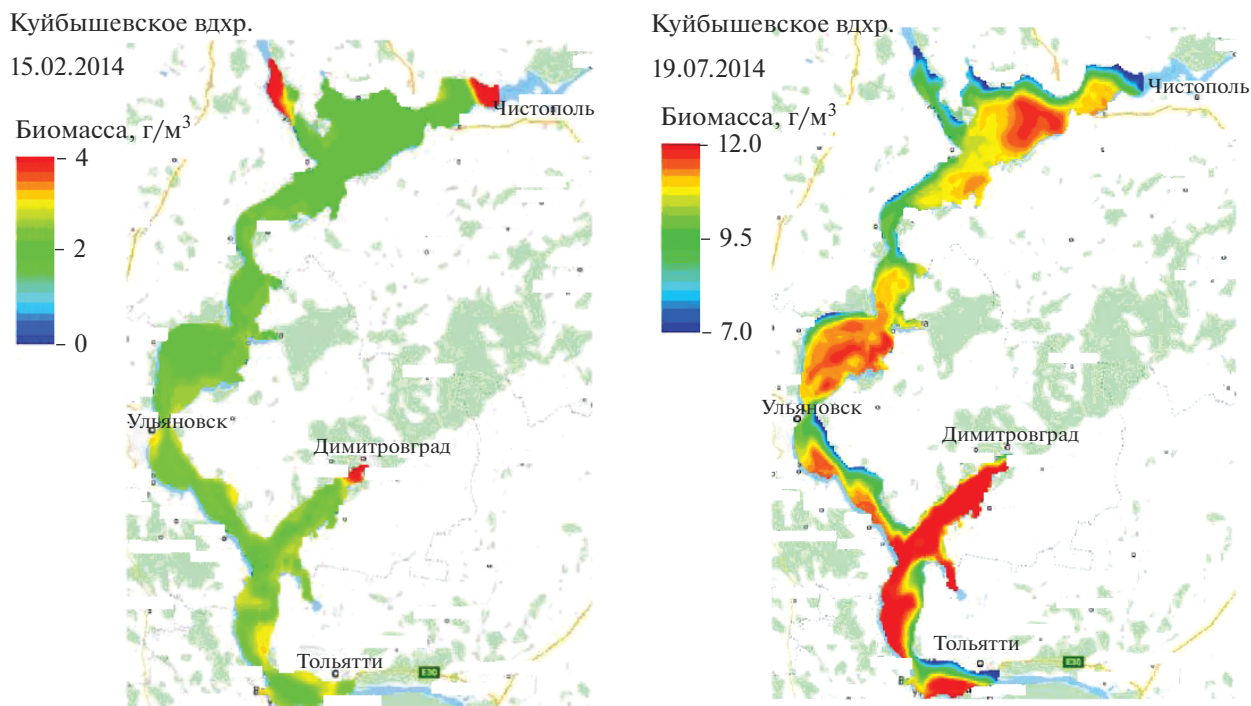


Рис. 7. Пространственное распределение общей биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в начале вегетационного периода и в середине лета.

расчетов гидрологического и гидрохимического блоков модели — гидрографы притока воды и поступления ЗВ с водосбора в Нижнекамское водохранилище с суточным шагом по времени.

Расчеты на водосборе дают входную информацию для модели ГМВ-МГУ. Эта двухмерная продольно-вертикальная модель позволяет рассчитывать ежесуточные изменения различных химических и биологических переменных, определяющих качество воды и продукционные характеристики экосистемы водохранилища в зависимости от гидрометеорологических условий конкретного года. В режиме реального времени модель позволяет проследить распределение концентраций химических веществ и биомасс гидробионтов в Нижнекамском водохранилище и ежедневные изменения этих показателей в сбросе воды, т.е. в нижнем бьефе водохранилища.

Сбросы Нижнекамского гидроузла в значительной степени определяют экологическое состояние нижележащего Куйбышевского водохранилища. Поэтому результаты расчетов качества воды в сбросах Нижнекамского гидроузла представляются важной входной информацией для реализации расчетов по трехмерной гидроэкологической модели Куйбышевского водохранилища, разработанной в Институте озераведения РАН на базе модели гидродинамики внутреннего

моря. Эта последняя модель системы позволяет отслеживать процессы формирования качества воды, распространения химических веществ и биомассы фитопланктона в Куйбышевском водохранилище.

Таким образом, представленный комплекс трех моделей может оперативно получать информацию о гидрологическом режиме и динамике показателей качества воды и загрязнений в системе водосбор—водохранилище с учетом их каскадного положения, т.е. с учетом трансформации качества воды в различных ступенях каскада.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Т. 9. Ч. 2. Река Кама. От города Чайковский до устья реки Вятка. Пермь: Администрация Волго-Балтийского бассейна, 2016. 74 с.
2. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Т. 10. Река Белая. От реки Уфа до устья. Пермь: Администрация Волго-Балтийского бассейна, 2017. 120 с.
3. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. К.К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.
4. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

5. *Ибраев Р.А.* Математическое моделирование термодинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 127 с.
6. *Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г.* Модель формирования стока для бассейна р. Амур // *Вод. ресурсы.* Т. 45. № 2. 2018. С. 121–132.
7. Куйбышевское водохранилище. Л.: Наука, 1983. 214 с.
8. *Меншуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н.* Состояние и перспективы развития моделирования экосистем пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения их водных ресурсов. СПб.: Нестор история, 2013. 118 с.
9. *Мотовилов Ю.Г.* Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // *Вод. ресурсы.* 2016. № 5. С. 467–475.
10. *Мотовилов Ю.Г.* Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // *Метеорология и гидрология.* 2017. № 2. С. 78–88.
11. *Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.  
DOI: 10.31857/S9785907036222000001
12. Приказ Росводресурсов от 28.10.2014 № 270 “Об утверждении Правил использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Каме”. 106 с.
13. *Пуклаков В.В.* Гидрологическая модель водохранилища. Руководство для пользователей. М.: ГЕОС, 1999. 96 с.
14. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 368 с.
15. *Смирнов Е.М., Зайцев Д.К.* Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // *Науч.-техн. ведомости.* 2004. № 2. 22 с.
16. *Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г.* Моделирование процессов азотного цикла на речном водосборе. Ч. 1. Источники поступления азота и процессы азотного цикла // *Вода: химия и экология,* 2017. № 3. С. 15–26.
17. *Хендерсон-Селлерс Б.* Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 336 с.
18. Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища / Под ред. С.М. Коновалова, В.Н. Паутовой. Л.: Наука, 1989. 304 с.
19. *Япаров И.М.* Атлас Республики Башкортостан. Уфа: Китап, 2005. 419 с.
20. CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality; User’s manual. Instruction Rep. E-82-1. US Army Engineer Waterways Experiment Station Environmental Laboratory. Vicksburg: Miss., 1986. 508 p.
21. *Chen C.T., Millero F.J.* Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 31(3). 1986. P. 657–662.
22. *Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G.* Modeling water pollution under different scenarios of zinc load on the Nizhnekamskoe Reservoir watershed // *Water Resour.* 2019. V. 46. Suppl. 2. P. S69–S80.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807819080074>
23. *Motovilov Yu. G.* ECOMAG: a distributed model of runoff formation and pollution transformation in river basins solution // *IAHS Publ.* 2013. V. 361. P. 227–234.
24. *Motovilov Yu. G., Fashchevskaya T. B.* Simulation of spatially-distributed copper pollution in a large river basin using the ECOMAG-HM model // *Hydrol. Sci. J.* 2019. V. 64. Is. 6. P. 739–756.
25. *Puklakov V.* Mathematical Model of the Heat and Mass Transfer Processes in a Stratified Reservoir // *Int. Review ges. Hydrobiol.* 80. 1995. № 1. P. 49–59.