

УДК 556.5:627.4

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2020 г. Ю. С. Даценко^а, *, В. В. Пуклаков^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119991 Россия

*e-mail: yuri0548@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 17.04.2020 г.

Представлены результаты адаптации имитационной гидроэкологической модели ГМВ-МГУ к Нижнекамскому водохранилищу. Обсуждены результаты серии диагностических модельных расчетов переменных, характеризующих экологическое состояние водохранилища за 2012–2015 гг. По результатам расчетов установлены основные закономерности пространственно-временных изменений характеристик качества воды Нижнекамского водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, гидроэкологическое состояние, имитационное моделирование, качество воды.

DOI: 10.31857/S0321059620050065

ВВЕДЕНИЕ

Регулирование речного стока и превращение Волги в каскад водохранилищ обусловило существенную трансформацию экологического состояния реки, степень которой зависит от особенностей формирования химического стока на водосборах водохранилищ и режима регулирования стока. Оценки изменений качества воды волжских водохранилищ под влиянием загрязненных вод, поступающих с водосборных территорий, привели к необходимости разработки методов управления и контроля гидрологических и гидрохимических процессов в системе водосбор–водоём. Наиболее эффективным методом установления закономерностей гидроэкологического режима водохранилищ при изменении внешних воздействий представляется математическое моделирование, позволяющее на основе диагностических расчетов экологических характеристик разработать конкретные научно обоснованные рекомендации по оптимизации эксплуатации отдельного водохранилища или каскада водохранилищ с учетом качества воды.

В настоящей работе гидрологическая модель водохранилищ ГМВ-МГУ адаптирована для расчета гидроэкологических характеристик Нижнекамского водохранилища. Выбранный для исследования объект – Нижнекамское водохранилище, одно из самых молодых водохранилищ Волжско-Камского каскада – осуществляет не-

глубокое регулирование речного стока р. Камы и имеет большое значение для регулирования Камской ветви каскада. Особенность Нижнекамского водохранилища, послужившая причиной его выбора для моделирования, состоит в том, что формирование качества воды в нем и динамика его экологического состояния в значительной степени зависит от внешней химической нагрузки на его экосистемы по боковым притокам, среди которых выделяется р. Белая, бассейн которой находится под сильным антропогенным воздействием.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нижнекамский гидроузел (г/у) создан в долине р. Камы у г. Набережные Челны в 69.5 км выше устья р. Вятки, он третий в каскаде ГЭС на р. Каме. Водоохранилище, образованное Нижнекамским г/у, расположено на территориях Республики Татарстан, Республики Башкортостан, Удмуртской Республики, водосбор водохранилища также включает в себя часть территорий Челябинской, Свердловской областей и Пермского края (рис. 1). Это водохранилище руслового типа, имеет комплексное назначение и используется для целей энергетики, водного транспорта, водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, рыбного хозяйства.

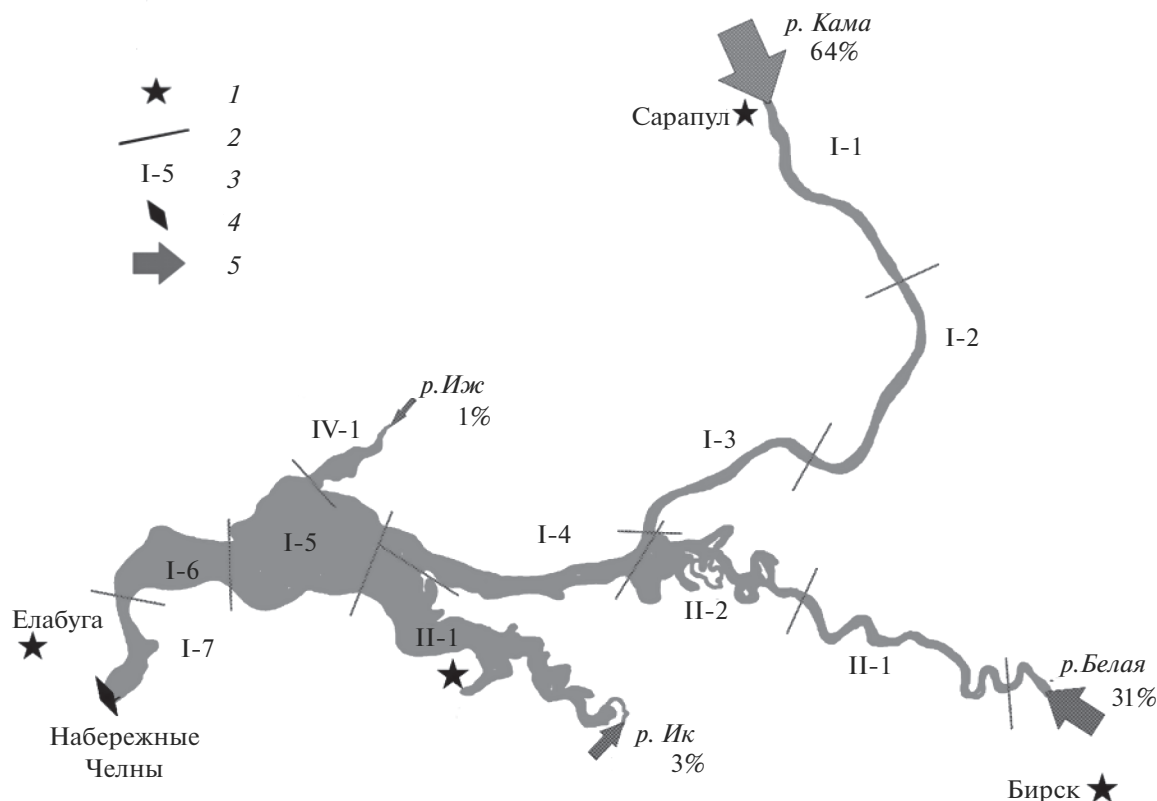


Рис. 1. Картограмма Нижнекамского водохранилища: 1 – метеостанции, 2 – границы выделенных отсеков, 3 – номера расчетных лопастей-отсеков, 4 – Нижнекамская ГЭС, 5 – речной приток и его доля (%) в среднегодовом притоке воды в водохранилище.

Проектная отметка нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища равна 68.0 м. Однако по ряду причин наполнение водохранилища не было завершено и оно эксплуатировалось при отметке НПУ 62.0 м. С 2002 по 2010 г. водохранилище эксплуатировалось на отметке 63.3 м, с 2010 г. – на отметке 62.0 м. В настоящее время уровень водохранилища поддерживается на отметках 63.0–63.3 м БС.

Объем водохранилища позволяет осуществлять недельное и суточное регулирование стока р. Камы с коэффициентом водообмена $K_v = 6.85$ [6]. Максимальная ширина водохранилища равна 15, средняя – 4 км. Подпор воды распространяется на 185 км по р. Каме и 157 км по р. Белой, средняя глубина – 3.3, наибольшая – 20 м, общая протяженность береговой линии – 1283 км. Общая площадь водосбора в створе гидроузла составляет 366 тыс. км².

Нижнекамское водохранилище – сложный водоем с морфологической, 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 приходится на боковой приток малых рек водосбора. Водохранилище ежегодно эксплуатируется при уровнях 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.

Для моделирования экологического состояния Нижнекамского водохранилища использована имитационная модель ГМВ-МГУ, наиболее полное описание которой приведено в [3]. В этой боксовой модели Нижнекамское водохранилище представлено в виде четырех состыкованных между собой лопастей, образовавшихся в результате затопления участков речных долин р. Камы и ее основных притоков после постройки Нижнекамского г/у. В общей сложности эти лопасти разбиты на 11 расчетных отсеков (рис. 1) с учетом их морфометрических и гидродинамических особенностей. Батиграфические кривые расчетных отсеков получены путем планиметрирования лоцманских карт, составленных в проекции Гаусса для Нижнекамского водохранилища в масшта-

Таблица 1. Связи переменных качества воды с расходом воды р. Белой

Показатель (Y)	Уравнение регрессии $Y=f(Q)$	Коэффициент корреляции
Гидрокарбонаты	$Y = 51.5 \ln(Q) + 52.7$	0.84
Взвешенные вещества	$Y = 0.0143Q + 19.6$	0.62
Сульфаты	$Y = 2813Q^{-0.461}$	0.92
Общая минерализация	$Y = 3771Q^{-0.298}$	0.89
Марганец	$Y = 0.000011Q + 0.058$	0.62
Железо общее	$Y = 0.000036Q + 0.051$	0.62

бе 1 : 25000 по р. Каме [1] и в масштабе 1 : 10000 по р. Белой [2] с учетом данных интерполяционных таблиц площадей и статических объемов водохранилища.

В исходных данных для расчетов задается информация о среднесуточных значениях метеорологических параметров в районе расчетных отсеков: сумма атмосферных осадков, скорость и направление ветра, температура воздуха и упругость водяного пара, общая и нижняя облачность, количество суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность на уровне моря при альбедо, равном нулю. Текущая гидрологическая информация для каждого расчетных суток включает в себя расходы воды основных притоков водохранилища (реки Кама, Белая, Ик и Иж) и расходы воды, поступающей в виде бокового притока отдельно с правого и с левого берегов частного водосбора каждого из отсеков.

С учетом большой протяженности водохранилища в меридиональном и в широтном направлениях в модели использованы данные четырех метеостанций, расположенных в непосредственной близости к водоему (рис. 1). Данные о ежедневных расходах сбросов воды в нижний бьеф Нижнекамского и Воткинского водохранилищ и расходах воды рек его водосбора, на которых ведутся гидрометрические наблюдения, получены с соответствующих сайтов гидрометеорологической информации [7–9]. Боковой приток воды с частных водосборов выделенных отсеков рассчитывался в виде отдельных потоков с их правого и левого берега по модулям стока на действующих гидрологических постах малых рек данного водосбора или рек.

Для подготовки гидрохимической информации анализировались эмпирические зависимости показателей качества воды от расхода воды в р. Белой. Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии этих зависимостей показаны в табл. 1.

Переменные качества воды, для которых связь с расходом воды оказалась статистически незначимой, задавались по результатам сплайновой

интерполяции их наблюдаемых значений. К таким переменным относятся бихроматная окисляемость, рН, нитраты (в модели они задаются в сумме с нитритами), аммонийный азот, минеральный фосфор, кремний. Концентрация растворенного кислорода в воде реки считалась близкой к насыщению и рассчитывалась по температуре воды.

Характеристики качества воды, поступающей в Нижнекамское водохранилище по р. Каме, задавались по данным наблюдений в нижнем бьефе Воткинского водохранилища.

На основе проведенных расчетов и обобщения данных по сбросам Воткинской ГЭС создан файл входной гидрохимической информации для модели ГМВ за период 2012–2015 гг. и проведены диагностические расчеты пространственно-временных изменений моделируемых переменных по продольным разрезам Камской лопасти и лопасти р. Белой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненной серии диагностических расчетов гидрологического режима Нижнекамского водохранилища получены закономерности пространственно-временных изменений показателей экологического состояния водохранилища за многолетний период. Рассчитанные значения экологических характеристик соответствовали диапазону их изменений, полученному по результатам редких гидрохимических исследований этого малоизученного водохранилища [4, 5]. В соответствии с принятой в модели схематизацией водохранилища результаты можно представить в виде продольных профилей распределения концентраций по лопасти р. Камы и по лопасти р. Белой на каждые сутки расчетного периода. Для описания сезонных закономерностей целесообразно выделить характерные для каждого сезона даты и анализировать распределение показателей в эти даты. В этом случае можно делать определенные выводы о пространственной динамике показателей в продольном направлении и по глубине водохранилища. Для характеристики

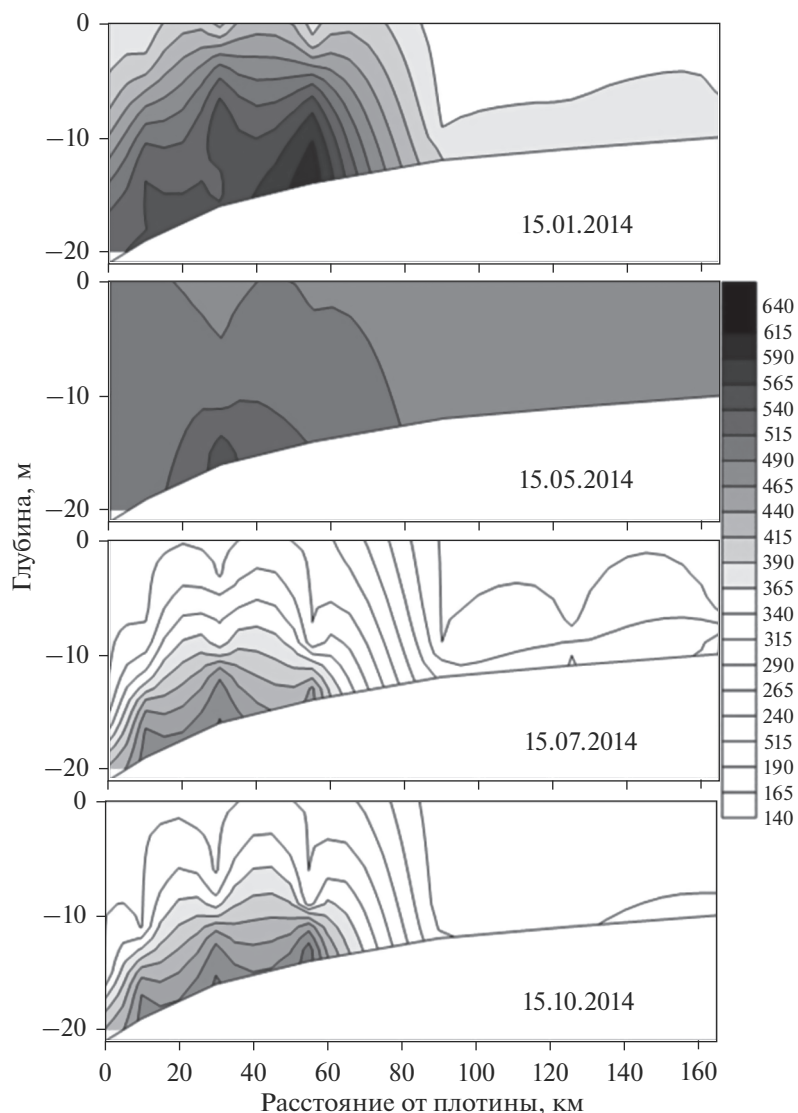


Рис. 2. Распределение удельной электропроводности воды (мкСм/см) в различные сезоны года по Камской лопасти водохранилища.

временных изменений использовалось распределение анализируемых показателей в наиболее глубоком приплотинном отсеке водохранилища за четырехлетний период, что дает возможность проследить особенности отдельных лет. В качестве характерных дат выбраны 15 января (зимний период), 15 апреля (мая) (период половодья), 15 августа (летний период) и 15 октября (осенний период). Распределение характеристик качества воды по продольному профилю расчетных лопастей в эти даты и их изменения в течение годового цикла в приплотинном плесе водохранилища анализировались на примере характерного (среднего по водности) 2014 г. Представленные ниже примеры профилей ХКВ по лопасти р. Камы и в приплотинном отсеке I-7 (рис. 2–7) иллюстриру-

ют возможности и результаты выполненного анализа.

Температура воды

Температурный режим водохранилища полностью соответствует общим закономерностям термических процессов в водоемах умеренной зоны. Длительность периода прогрева и летней стратификации незначительно варьирует в рассматриваемые годы — от 240 дней в 2015 г. до 280 в 2013 г. Вследствие особенностей гидрометеорологических условий в отдельные годы различаются и даты начала летней стагнации и наступления осеннего перемешивания водоема. Слой температурного скачка во все годы был на значительной глубине (~10 м) и характеризовался неболь-

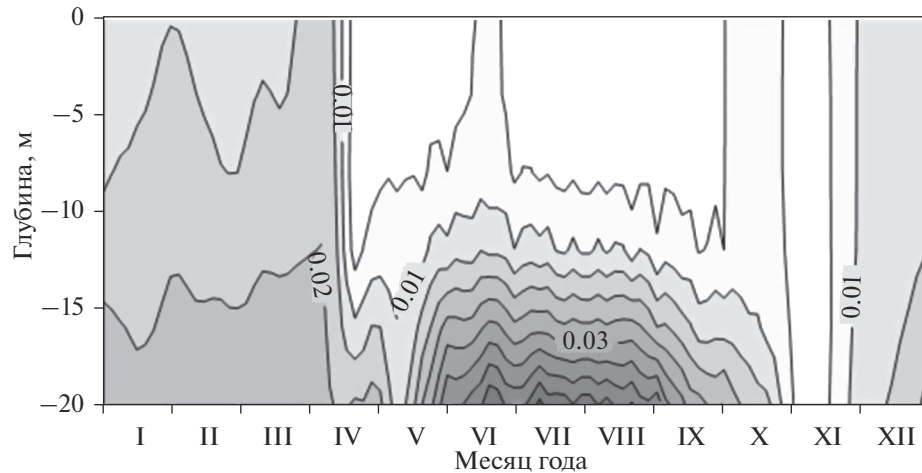


Рис. 3. Распределение минерального фосфора в приплотинном отсеке Нижнекамского водохранилища в 2014 г.

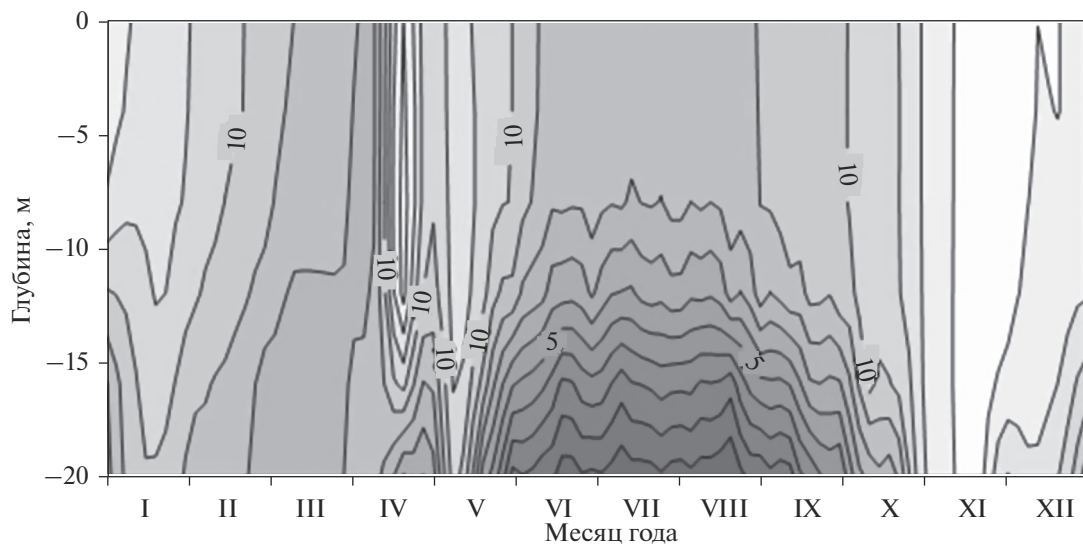


Рис. 4. Распределение растворенного кислорода в приплотинном отсеке Нижнекамского водохранилища в 2014 г.

шими градиентами температур. В летний период во все годы наблюдений выделяются фазы интенсивного прогресса эпилимниона водохранилища при антициклональной погоде, которые сменяются вертикальным перемешиванием, иногда (особенно в 2013 и 2014 гг.) практически достигавшем дна. В целом наличие температурной стратификации водной массы водохранилища в летний период сохраняется длительное время.

Минерализация воды

Распределение в водохранилище показателя качества воды — электропроводности характеризует сезонные особенности динамики водных масс. Результаты расчетов электропроводности в

продольно-вертикальном разрезе по Камской лопасти в различные сезоны показаны на рис. 2.

В зимний период водохранилище характеризуется явно выраженной стратификацией минерализации в отсеках нижней части Камской лопасти (после впадения р. Белой). Весной в период половодья водохранилище полностью промывается однородными по минерализации водами Воткинского водохранилища и р. Белой, что свидетельствует о его высокой проточности в этот период. Летом в водохранилище наблюдается продольная неоднородность водных масс по электропроводности воды, наиболее ярко выраженная ниже устья р. Белой в пределах отсека I-4. В нижней части водохранилища формируется вертикальное расслоение вод по электропровод-

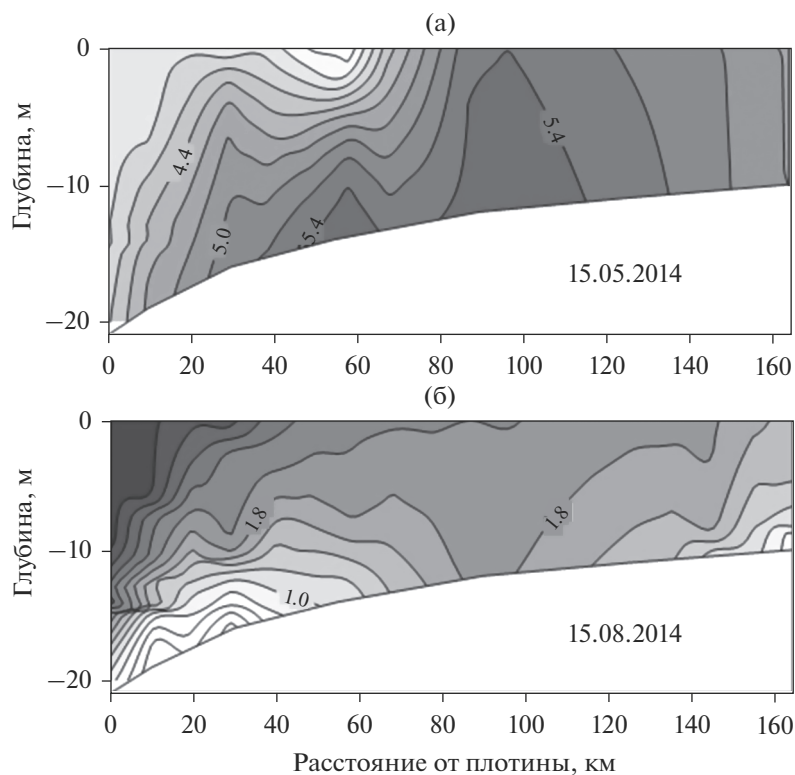


Рис. 5. Распределение биомасс: а – диатомовых, б – синезеленых водорослей Камской лопасти водохранилища в характерные даты весеннего (15.05.2014) и летнего (15.08.2014) периодов.

ности с повышенной концентрацией высокоминерализованных вод в придонных горизонтах. Аналогичная структура водных масс в водохранилище сохраняется и в осенний период, хотя продольные и вертикальные градиенты электропроводности воды выражены в это время слабее. Лопасть р. Белой, в отличие от лопасти р. Камы, характеризуется пространственной неоднородностью по электропроводности воды не только летом, но и весной, что, вероятно, обусловлено проникновением маломинерализованных весенних вод р. Камы, поступающих из Воткинского водохранилища, в лопасть р. Белой и их распространением в поверхностных горизонтах над более минерализованными водами этой реки.

Биогенные и органические вещества

Распределение содержания минерального фосфора в водохранилище (рис. 3) в течение года характеризуется общими для глубоких стратифицированных водоемов закономерностями: максимальные концентрации фосфатов наблюдаются в зимний период и относительно мало меняются на всем его протяжении, в весенний и осенний периоды наблюдается вертикальная однородность по этому показателю, а летом – резко выраженное увеличение содержания фосфатов в при-

донных горизонтах глубоководных отсеках нижней части водоема. В эпилимнионе Нижнекамского водохранилища минеральный фосфор нередко практически полностью исчезает летом во время интенсивного развития фитопланктона. Межгодовые различия этих закономерностей небольшие и связаны, как и особенности динамики вод, с гидрометеорологическими условиями года.

Особенности изменения распределения содержания минерального фосфора в водной массе водохранилища в течение годового цикла в общих чертах повторяют характер изменения ее электропроводности, за исключением возможности его полного исчезновения летом в верхнем 10-метровом слое водохранилища.

В лопасти водохранилища по р. Белой концентрации фосфатов мало отличаются от их концентраций в Камской лопасти, поэтому маловероятно, чтобы лопасть р. Белой характеризовалась более высокой первичной продуктивностью органического вещества и более высоким трофическим уровнем.

Из минеральных форм азота наибольший интерес вызывает аммонийный азот. Главная отличительная особенность распределения аммонийного азота в водохранилище – наличие ярко вы-

раженной вертикальной неоднородности его содержания в начале летнего периода, сохраняющейся относительно непродолжительное время (немногим более 3 недель). В остальное время года характер распределения аммонийного азота в водохранилище близок к распределению минерального фосфора, за исключением наличия более контрастно выраженной пространственной неоднородности его концентраций в летний и весенний периоды года.

Еще более яркая контрастность характерна для распределения концентраций общего железа по продольной оси водохранилища, которая наблюдается во все сезоны года. Однако вертикальные градиенты этого показателя фиксируются только в нижней глубоководной части водохранилища.

Распределение в водохранилище такого показателя качества воды, как перманганатная окисляемость (ПО), используемого для контроля динамики содержания легкоокисляющихся органических веществ природного происхождения, во многом повторяет характер распределения и особенности его изменения в течение года, свойственные электропроводности воды. Основной особенностью ПО водохранилища следует считать исключительно высокие значения ее вертикальных градиентов в придонных слоях нижних глубоководных отсеков во все периоды года, кроме весеннего.

Растворенный кислород и фитопланктон

Внутригодовые циклы растворенного кислорода (РК) в Нижнекамском водохранилище в отдельные годы очень близки. Несколько различаются от года к году особенности формирования зон аноксии в летний период, в зимний период аноксия в водохранилище не наблюдается. Общие объемы воды с отсутствием растворенного кислорода, как правило, невелики, что связано, по-видимому, с невысокой продуктивностью водохранилища и с небольшими плотностными градиентами в слое скачка в период летней стратификации вод (рис. 4). Зоны аноксии наблюдаются исключительно в нижней глубоководной части водохранилища.

Цветение Нижнекамского водохранилища, как и всех водохранилищ каскада, определяется двухпиковым развитием фитопланктона — весенним пиком диатомовых водорослей и летним пиком синезеленых водорослей. Рис. 5 иллюстрирует распределение в лопасти р. Камы диатомовых водорослей в мае и синезеленых водорослей в августе 2014 г. Майское цветение диатомовых водорослей доминирует в верхней части водохранилища и захватывает всю толщу воды во все рассматриваемые годы. Максимальные биомассы водорослей

немногим превышают 5 мг/л, а к приплотинному участку водохранилища снижаются до 3–4 мг/л. Некоторые различия в характере пространственного распределения диатомовых водорослей в водохранилище в отдельные годы определяются особенностями их гидрометеорологического режима.

Синезеленые водоросли в водохранилище развиваются с июня до октября. Интенсивность цветения летнего фитопланктона в водохранилище незначительно варьирует по годам с максимумами биомасс в пределах 3–5 мг/л.

Ежегодно повторяющееся закономерное распределение биомасс синезеленых водорослей по продольной оси водохранилища в Камской лопасти характеризуется максимумами биомасс в приплотинном участке (в отличие от диатомовых водорослей), причем в 2014 и 2015 гг. этот максимум отмечался не на поверхности, а на небольшой глубине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов диагностических расчетов гидрологического режима Нижнекамского водохранилища показывает, что пространственно-временное распределение основных химических и биологических характеристик качества воды водохранилища в целом соответствует закономерностям, свойственным долинным водохранилищам умеренной климатической зоны. Некоторые особенности режима отдельных параметров экологического состояния водохранилища, наблюдающиеся в разные годы, обусловлены влиянием изменяющихся гидрометеорологических факторов, которые могут быть успешно воспроизведены при моделировании. Однако главное преимущество метода математического моделирования перед проведением полномасштабных полевых исследований — это возможность количественной оценки различных вариантов антропогенного воздействия на экосистему водохранилища методом сценарных расчетов.

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-Балт, 2016. 74 с.
2. Атлас единой глубоководной системы Европейской части РФ. Т. 10. Река Белая. От реки Уфа до устья. Пермь: Администрация Волго-Балт, 2017. 120 с.

3. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. К.К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.
4. *Махотина М.К.* Характеристика зоопланктона Нижнекамского водохранилища на первом этапе его формирования // Сб. науч. Тр. ГосНИОРХ. 1985. Вып. 240. С. 112–118.
5. *Шакирова Ф.М., Говоркова Л.К., Анохина О.К.* Современное состояние Нижнекамского водохранилища и возможности рационального освоения его рыбных ресурсов // Изв. Самарского НЦ РАН. 2013. Т. 15. № 3(1). С. 518–527.
6. *Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
7. <http://gmvo.skniivh.ru>
8. <http://hgraph.ru/>
9. <http://tatarmeteo.ru/gidrologiya>