

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА КРУПНЫХ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков, К. К. Эдельштейн

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Ленинские горы, д.1, Москва, ГСП-1, 119991, yuri0548@mail.ru

В статье дается краткий обзор успешного применения гидрологической модели водохранилища при решении различных гидроэкологических задач. Приводятся результаты верификации модели с использованием детальных наблюдений. Обсуждаются особенности адаптации модели для Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ Волжско-Камского каскада и представлены некоторые результаты расчета биомасс фитопланктона рассмотренных водохранилищ.

Ключевые слова: Рыбинское и Куйбышевское водохранилища, моделирование, гидроэкологический режим, биомасса фитопланктона, верификации модели.

DOI: 10.24411/0320-3557-2018-10029

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологическим режимом называют закономерно повторяющиеся изменения гидрологического состояния водного объекта [Михайлов и др., 2005 (Mikhajlov et al., 2005)]. Это состояние определяет функционирование всей его биоты, поэтому гидроэкологическим режимом водохранилищ мы называем взаимосвязанное закономерное изменение их гидрологического и биологического состояний.

Особенности гидроэкологического режима водохранилищ зависят от многих гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов:

- от изменчивости поступающего в водохранилище речного стока, его природного химического состава и мутности воды, а также от ее антропогенной загрязненности, поскольку большинство водохранилищ находится в густонаселенных и промышленно развитых регионах;
- от интенсивности перемешивания при перемещении воды из верховьев к гидроузлу стоковым течением, скорость которого изменяется в половодья и паводки, при сбросах изменяемых расходов воды в нижний бьеф, а также ветровыми и плотностным течениями;
- от плотностной расслоенности водной толщи и устойчивости стратификации к динамическому и конвективному перемешиванию, которые зависят от меняющейся в течение суток и при смене погоды интенсивности водо-, тепло- и газообмена акватории с атмосферой, а придонного слоя воды с донными грунтами, отложениями и водоносными горизонтами побережья;
- от изменчивости проникающей в воду солнечной энергии, а, следовательно, как и обменные процессы воды с атмосферой, от из-

менения метеорологических характеристик при сменах погоды;

- от состава и интенсивности жизнедеятельности всех организмов биоты водохранилища, особенно от продукционно-деструкционных процессов, эффективности очищения при этом воды от загрязняющих ее веществ и микроорганизмов, называемого нередко самоочищением воды.

Удлиненная, нередко извилистая и углубляющаяся к гидроузлу форма ложа, характерная для большинства долинных и котловинно-долинных водохранилищ, свойственный им неустановившийся водообмен и накопление воды нескольких фаз водного режима притоков определяют сложную гидрологическую структуру водоемов, предназначенных для многолетнего и сезонного регулирования стока. Водные массы в них отличаются существенной неоднородностью состава и качества воды [Эдельштейн, 2018 (Edelshtein, 2018)].

Изменчивость внешних воздействий на водоем, обусловленная нестационарностью природных процессов и антропогенного влияния, вызывает необходимость все более детализировать изучение временной и пространственной изменчивости гидроэкологического состояния водных масс в водохранилищах с целью уточнения роли отдельных процессов в формировании питьевых и технологических качеств воды, ее самоочищения и биологической продуктивности водохранилищных экосистем. Оценка результативности таких исследований, выполняющихся с использованием все более точных полевых приборов с емкой цифровой памятью, становится невозможной без воспроизведения математическими моделями гидроэкологического режима водоема и

сопоставления его результата с данными полевых наблюдений. Обнаруживаемые при этом расхождения расчета с наблюдением дают стимул к все более углубленному изучению совокупности внутриводоемных процессов. Поэтому в современной лимнологии одновременно с совершенствованием приборов и методов полевых исследований столь большое внимание уделяется разработке гидроэкологических моделей озер и водохрани-

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для параметризации очень сложного ансамбля взаимосвязанных гидроэкологических процессов на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ разработана и совершенствуется математическая квазидвумерная боксовая гидрологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ [Пуклаков, 1999 (Puklakov, 1999)].

В качестве гидродинамической основы ГМВ-МГУ используется модель тепломассообмена (ТМО) [Пуклаков, 1995 (Puklakov, 1995)], в которой описывается большинство физических процессов, протекающих в водоеме и на его границах с внешней средой. Модель ГМВ-МГУ включает в себя кроме гидродинамического блока еще и экологический блок, который позволяет рассчитывать изменения концентрации 17 переменных, характеризующих экологическое состояние водоема. Наиболее детальное описание алгоритма ГМВ-МГУ и ее верификации представлено в монографии [Гидроэкологический режим..., 2015].

В блоках ее алгоритма (рис. 1) формализовано большое число процессов, протекающих в водохранилищах и на их границах с внешней средой. Она предназначена для расчета гидрологического режима водохранилищ в течение всего годового цикла.

Водоохранилище схематизируется в модели в виде отдельной лопасти (морфологически простой водоем, созданный в участке долины), либо в виде совокупности состыкованных лопастей, представляющих затопленные участки главной долины и долин крупных притоков (морфологически сложное водохранилище). Каждая лопасть делится в продольном направлении на расчетные отсеки (РО) с учетом морфометрических и гид-

лич. Использование таких моделей дает возможность оценить вероятный диапазон изменчивости характеристик качества воды в периоды с экстремальными погодными условиями, обостряющими негативные последствия антропогенных воздействий, и разработать мероприятия по предотвращению сложных ситуаций, возникающих из-за этого на водопроводных станциях.

родинамических особенностей плесов затопленной долины.

Математическая модель основана на классическом одномерном алгоритме расчета вертикальной структуры водоема [Chen, Orlob, 1975], последовательно примененном к расчетным отсекам водохранилища. Уровень водной поверхности предполагается горизонтальным и рассчитывается как функция первоначального уровня и объема аккумуляции воды в водохранилище.

В основу модели заложены балансовые уравнения, отражающие неразрывность водной среды и закон сохранения вещества и энергии в каждом боксе отсека при условии мгновенного смешения притока с содержащимся расчетного бокса. Водный и тепловой балансы рассчитываются по рекомендациям нормативных документов [Руководство..., 1983]. Внутриводоемная динамика вод определяется внешним тепло- и водообменом (приток воды с водосбора, обмен с атмосферой и ложем, техногенный водоотбор), воздействием ветра на водную поверхность и пространственной плотностной неоднородностью водных масс водохранилища.

В горизонтальном водообмене между отсеками учитываются стоковые, дрейфовые, плотностные и компенсационные течения. Вертикальный водообмен между боксами отсека определяется нестационарностью процессов горизонтального притока и стока воды, динамическим перемешиванием в стоковом течении, эффективным турбулентным перемешиванием, свободной конвекцией и вынужденной конвекцией в виде циркуляции Ленгмюра. На каждом шаге расчета в модели выполняется контроль баланса вещества и энергии.

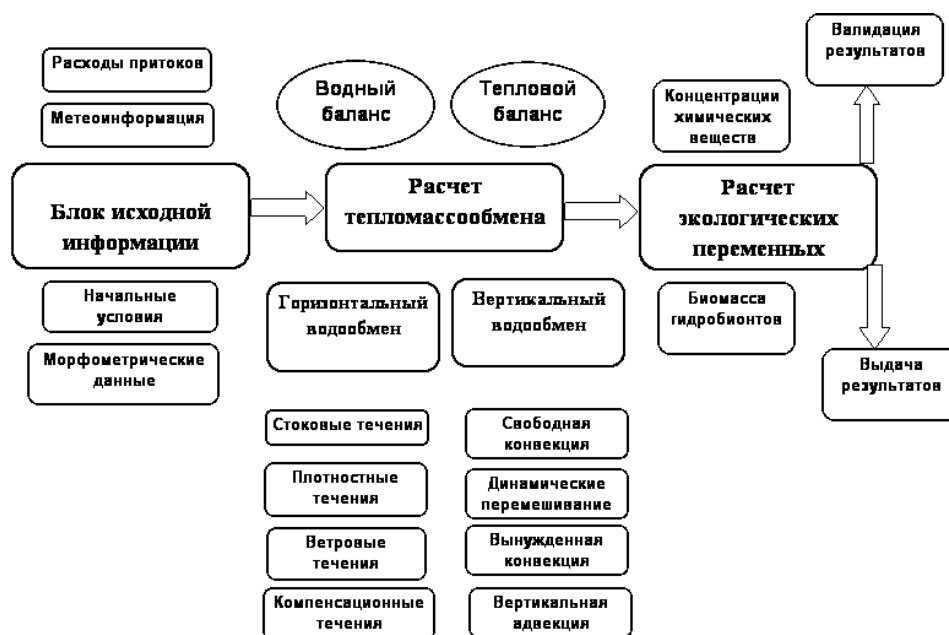


Рис. 1. Схема расчетов по модели ГМВ-МГУ

Fig. 1. The scheme of calculations by the model of GMV-MSU

Наиболее детальную верификацию и валидацию ГМВ-МГУ прошла на водохранилищах Московского региона [Гидроэкологический режим..., 2015]. Достоверность верификации модели определяется полнотой имеющихся данных наблюдений за гидрологическим состоянием водоема. Из подмосковных водохранилищ наиболее изучено Можайское водохранилище на р. Москве. Для Можайского водохранилища валидационные расчеты воспроизводимости режима среднесуточных значений основных экологических переменных в периоды между гидролого-гидрохимическими съемками были выполнены по данным 1984 года (10 съемок) и 2012 года (8 съемок), в течение которых были получены наиболее массовые данные наблюдений. Длина рядов значений оцениваемых характеристик состава воды изменялась от 41 до 245 для каждой съемки. В таблице 1 приводятся средние значения (числитель) и диапазон изменения (знаменатель) критериев Тэйла (Т), Нэша-Сатклифа (NS) и гидрологического критерия S/σ .

Оценки модельного расчета развития фитопланктона в Можайском водохранилище в разные по гидрометеорологическим условиям годы также показали вполне удовлетворительный результат [Датенко, Пуклаков, 2010 (Datzenko, Puklakov, 2010)].

Успешная валидация модели ГМВ-МГУ позволила диагностическими расчетами решить ряд прикладных и теоретических за-

дач. В качестве инструмента научного исследования она была использована для:

- оценки длительности существования и вклада стоковых, плотностных и компенсационных течений в процессы внутреннего тепло- и водообмена в годы различной водности [Пуклаков, Эдельштейн, 2001 (Puklakov, Edelshtein, 2001)]
- изучения реакции экосистемы водохранилища на различные гидрометеорологические условия и управленческие операции, связанные с изменением режима сбросов воды через разноуровневые водосбросные отверстия гидроузла [Эдельштейн, Пуклаков, 1996 (Edelshtein, Puklakov, 1996)]
- оценки влияния морфологического типа водохранилища на изменение гидрологической структуры водохранилища, пространственного распределения и концентрации фитопланктона [Пуклаков и др., 2016 (Puklakov et. al., 2016),
- подтверждения эффективности экологической реконструкции водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования, [Чернега, 2006 (Chernega, 2006)],
- прогноза возможных изменений гидрологического режима водохранилищ при потеплении климата [Гречушникова, 2014 (Grechushnikova, 2014)],
- расчета внутригодовых изменений интенсивности обмена кислородом и углекислым газом между водной поверхностью и атмосферой [Эдельштейн и др., 2018 (Edelshtein et. al, 2018)].

Таблица 1. Значения критериев моделирования показателей гидрохимического режима в плесах Можайского водохранилища в 1984 и 2012 гг.

Table 1. The values of the criteria for modeling indicators of the hydrochemical regime in the Mozhaisk Reservoir in 1984 and 2012

Показатель Indicator	Критерии Criteria		
	T	NS	S/σ
Температура воды, Water temperature, t	<u>0.08</u> 0.00÷0.34	<u>0.76</u> 0.39÷0.93	<u>0.48</u> 0.26÷0.78
Электропроводность, Electrical conductivity, κ	<u>0.06</u> 0.00÷0.16	<u>0.57</u> 0.00÷0.76	<u>0.63</u> 0.49÷0.80
Щелочность, Alkalinity, Alk	<u>0.13</u> 0.09÷0.24	<u>0.68</u> 0.56÷0.79	<u>0.56</u> 0.46÷0.66
Содержание кислорода, Oxygen content, O ₂	<u>0.15</u> 0.00÷0.38	<u>0.66</u> 0.50÷0.84	<u>0.59</u> 0.39÷0.77
Фосфор минеральный, Phosphorus mineral, PO ₄	<u>0.22</u> 0.02÷0.40	<u>0.37</u> -1.14÷0.76	<u>0.79</u> 0.49÷1.48
Аммоний, Ammonium, NH ₄	<u>0.31</u> 0.28÷0.34	<u>0.51</u> 0.36÷0.64	<u>0.69</u> 0.60÷0.80
Нитраты и нитриты, Nitrates and nitrites, NO ₃ +NO ₂	<u>0.34</u> 0.29÷0.38	<u>0.55</u> 0.46÷0.69	<u>0.67</u> 0.55÷0.74
Перманганатная окисляемость, Permanganate oxidation, ПО	<u>0.07</u> 0.00÷0.20	<u>0.51</u> -1.75÷0.85	<u>0.65</u> 0.38÷1.66
Бихроматная окисляемость, Bichromate oxidation, БО	<u>0.12</u> 0.00÷0.30	<u>0.54</u> -0.52÷0.84	<u>0.66</u> 0.40÷1.23

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эти приложения модели были реализованы преимущественно на сравнительно небольших водохранилищах, поэтому особый интерес вызывает возможность ее применения для крупных сложно-долинных водохранилищ. Первый опыт применения модели для крупных водохранилищ связан с моделированием гидроэкологического состояния Рыбинского водохранилища. Это морфологически сложное котловинно-долинное водохранилище представлено в модели в виде состыкованных между собой лопастей, представляющих затопленные долины Волги и ее основных притоков. Каждая лопасть делится в продольном направлении на отсеки (рис. 2) с учетом ее морфометрических осо-

бенностей. Учитывая форму водохранилища в описание процессов внутреннего горизонтального обмена, были внесены существенные изменения. Ветровая циркуляция воды в водохранилище рассчитывается по включенному в модель алгоритму гидродинамического блока программного комплекса ИБВВ [Поддубный, Сухова, 2002 (Poddubny, Sukhova, 2002)]. Верификация модели, проведенная по данным синхронных гидрологических съемок Рыбинского водохранилища, показала высокую адекватность модельного воспроизведения основных характеристик гидрологического режима водохранилища [Пуклаков и др. 2013 (Puklakov et. al., 2013)].

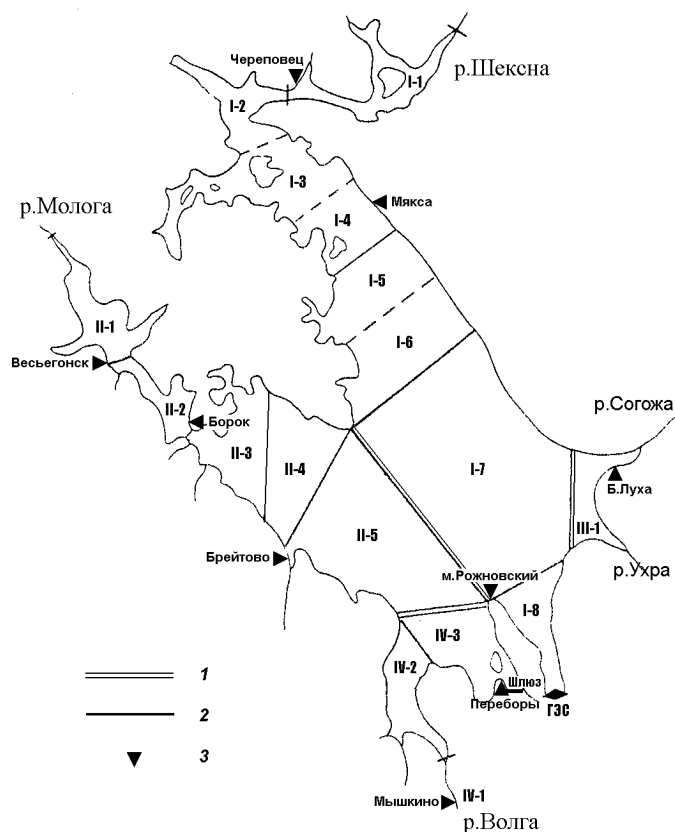


Рис. 2. Схема Рыбинского водохранилища: 1 – границы лопастей, 2 – границы отсеков, 3 – водомерные посты.

Fig. 2. Rybinsk Reservoir Scheme: 1 – the boundaries of the blades, 2 – the boundaries of the compartments, 3 – water gauging posts.

По адаптированному к Рыбинскому варианту модели были проведены расчеты биомассы фитопланктона в экстремальные по водности годы – многоводный 1962 г. и маловодный 1964 г. Для верификации результатов расчета биомассы выбирались отсеки водохранилища, соответствующие расположению шести стандартных станций съемок водохранилища. В соответствие с принятой схематизацией к ним относились отсеки 6, 7, и 8 первой лопасти, отсек 4 второй лопасти и отсеки 2 и 3 третьей лопасти – итого всего 6 станций.

Основные черты режима фитопланктона в водохранилище удовлетворительно воспроизводятся модельными расчетами. Биомассы весеннего развития диатомовых и летнего – синезеленых как максимальные, так и средние оказались близки реально наблюдавшимся. В качестве критерия адекватности модели использовался широко распространенный в экологическом моделировании критерий Тэйла [Theil, 1971]. В большинстве случаев значение критерия Тэйла < 0.4 (табл. 2).

Таблица 2. Модельная воспроизводимость по критерию Тейла биомассы фитопланктона в Рыбинском водохранилище в экстремально водные годы

Table 2. Model reproducibility by the Tayl criterion phytoplankton biomass in the Rybinsk reservoir in extreme water years

Годы Years	Диатомовые Diatoms	Синезеленые Blue green
1962	0.41	0.20
1964	0.36	0.39

Удовлетворительное воспроизведение модельным расчетом изменчивости биомассы планктонных водорослей в вегетационный период года указывает на то, что используемый расчетный алгоритм модели ГМВ-МГУ полностью адекватен всему ансамблю внутриводоемных процессов формирования качества воды в этом крупном водохранилище. Это открывает возможность ее использования для анализа откликов фитопланктонного сообщества на различные антропогенные и природные внешние воздействия.

Геоморфологическое строение затопленных долин р. Волги и Камы обусловили сложную конфигурацию еще одного водохранилища – Куйбышевского, крупнейшего в Волжско-Камском каскаде.

К особенностям водохранилища, определяющим сложность моделирования его гидрологического режима, можно отнести значительную протяженность водохранилища в меридиональном направлении, различ-

ные условия формирования стока воды с бокового водосбора различных частей водохранилища, расположенных в разных географических зонах и сложность его морфологического строения. Для учета этих особенностей водохранилища при имитации его гидрологического режима в алгоритм ГМВ-МГУ были внесены изменения, которые предусматривали задание метеоусловий в пределах каждого отсека по данным ближайшей к нему метеостанции и задание бокового притока воды с частных водосборов выделенных отсеков в виде отдельных потоков с их правого и левого берега.

Сложное морфологическое строение Куйбышевского водохранилища схематизировано в виде 5 состыкованных между собой лопастей, в пределах которых выделено в общей сложности 19 расчетных отсеков (рис.3.) с учетом их морфометрических и гидродинамических особенностей.

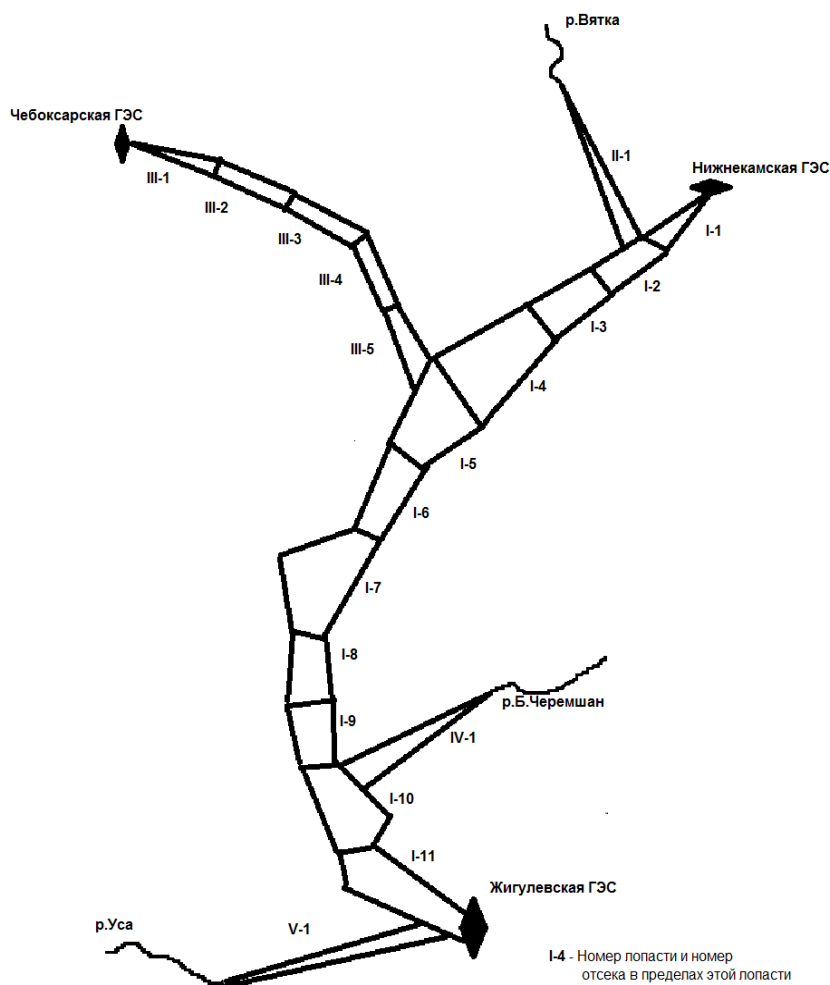


Рис. 3. Схематизация Куйбышевского водохранилища в виде расчетных лопастей и отсеков.

Fig. 3. Schematization of the Kuibyshev reservoir in the form of calculated blades and compartments.

Учитывая большую протяженность водохранилища в меридиональном и в широтном направлении (расстояние с запада на восток от Чебоксарской ГЭС до Нижнекамской ГЭС составляет по прямой >450 км), в модели были использованы все 12 метеостанций, расположенных в непосредственной близости к водохранилищу.

Такие изменения в алгоритме модели учитывают различия в приходе солнечной радиации на поверхность северных и южных отсеков и особенности формирования стока воды с их водосборов, расположенных в разных природных зонах.

В качестве главной лопасти (Л), в пределах которой выделено 11 расчетных отсеков (РО), приняты затопленные долины р. Камы от Нижнекамского гидроузла до Камского устья (Л-I:PO1–PO4) и р. Волги ниже ее слияния с р. Камой и до Жигулевского гидроузла (Л-I:PO5–PO11). К главной лопасти примыкают 4 боковые лопасти по затопленным долинам р. Вятки (Л-II), р. Волги от Чебоксарского гидроузла до Камского устья (Л-III:PO1–PO5), р. Б. Черемшан (Л-IV) и р. Уса (Л-V).

Чтобы исключить искажения в морфометрии водохранилища, которые возникают при принятом в модели допущении горизонтальности уровня воды и практически постоянном наличии кривой выклинивания подпора в верхней части водоема, высотные отметки кривых площадей отсеков были скорректированы таким образом, чтобы среднемноголетняя кривая выклинивания подпора, полученная по данным об уровне воды на водомерных постах, расположенных по продольной оси водохранилища, стала прямой линией.

Модель ГМВ-МГУ использована для диагностических расчетов гидроэкологических переменных за период 2012–2015 гг. Сравнение значений температуры воды и стратификации показывает, что расчет адекватно отражает режим температуры воды по плесам водохранилища и стратификацию водной толщи в течение вегетационного сезона, несмотря на различия в длительности осреднения сравниваемых периодов.

Однако наибольший интерес представляют результаты расчета фитопланктона

водоема. Расчетные максимальные биомассы синезеленых водорослей во все годы наблюдались в Камском плесе водохранилища и колебались в пределах 6–8 мг/л. На рис. 4 показан пример рассчитанного распределения биомассы синезеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище в период их интенсивного развития 15 августа.

К его центру биомассы снижаются до 3 мг/л, а в приплотинном участке вновь заметно цветение синезеленых (до 5 мг/л). Вертикальная стратификация этих водорослей характерна для глубоких отсеков нижней части Камской лопасти и связана с термической и плотностной стратификацией водных масс водохранилища летом. Для этого водоема характерно глубокое перемешивание эпилимниона, поэтому высокие значения биомасс водорослей в летний период фиксируются на глубинах до 10 м.

Результаты сравнения рассчитанных и наблюдавшихся величин, полученных из справочника многолетних мониторинговых наблюдений на водохранилище, показаны в табл. 3. В ней приводится сравнение наиболее надежных обобщенных данных о средней биомассе фитопланктона по плесам водохранилища в [Куйбышевское водохранилище..., 2008] и результаты модельного расчета средней за 2012–2015 гг. биомассы фитопланктона в этих же плесах.

В таблице 4 представлено сравнение средних значений наблюдаемой (1975–84) и рассчитанной (2012–15) биомассы фитопланктона по отдельным видам водорослей в различных плесах водохранилища.

Как видно из таблиц 3 и 4, результаты расчета биомассы фитопланктона по отдельным плесам акватории Куйбышевского водохранилища (в том числе и по их видовому составу) можно считать вполне удовлетворительными.

Опыт применения модели ГМВ-МГУ показывает, что она может быть эффективным инструментом при исследовании реакции гидроэкологического состояния водохранилищ на антропогенное воздействие в виде поступления загрязняющих веществ с водосбора не только небольших, но и крупных водохранилищ со сложной морфологической структурой.

ВЫВОДЫ

Расчеты по модели ГМВ-МГУ могут послужить основой прогноза реакции экосистемы на внешние воздействия и при планировании комплекса водоохраных мероприятий в бассейне водохранилища. При этом

неизменно возникает проблема учета чрезвычайно высокой изменчивости этих воздействий, обусловленной нестационарностью как природных процессов, так и антропогенного влияния, включая варианты реализации

проекта водоохраных мероприятий. Выход может быть найден в проведении многовариантных имитационно-диагностических расчетов по модели. Получение разнообразных наборов решений, отвечающих изменяемым исходным данным, т.е. численное экспериментирование с использованием модели вместо рискованного, а зачастую неосуществимого натурального экспериментирования на объекте, является одной из целей математического гидроэкологического моделирования. Таким путем появляется возможность

обоснования соответствующих решений в стратегии и тактике управления экосистемой. Моделирование дает возможность оценить вероятный диапазон изменчивости характеристик качества воды в периоды с экстремальными погодными условиями, обостряющими негативные последствия антропогенных воздействий, и разработать мероприятия по предотвращению сложных ситуаций, возникающих из-за этого у водопотребителей.

Таблица 3. Средняя за вегетационный сезон (май-октябрь) биомасса (мг/л) фитопланктона по плесам Куйбышевского водохранилища

Table 3. The average for the vegetation season (May-October) phytoplankton biomass (mg / l) in the reaches of the Kuibyshev reservoir

Период Period	Лопать (Л) и расчетный отсек (РО) Blade (L) and the design compartment (RO)						
	Л-III:PO5	Л-I:PO5	Л-I:PO6	Л-I:PO7	Л-I:PO8	Л-I:PO10	Л-I:PO11
1975–84	4.7	9.7	6.1	5.3	4.1	5.2	5.4
2012–15	6.4	7.7	6.5	5.4	4.5	3.6	3.9

Таблица 4. Средние значения биомассы (мг/л) отдельных видов фитопланктона

Table 4. Average values of biomass (mg / l) of individual phytoplankton species

Период	1975–84	2012–15	1975–84	2012–15	1975–84	2012–15
Плес	Диадомовые		Синезеленые		Прочие	
Л-III:PO–5	2.8	2.7	1.4	3.5	0.5	0.2
Л-I:PO–5	8.5	3.6	0.5	3.1	0.8	1.1
Л-I:PO–6	4.9	3.0	0.6	2.8	0.6	0.8
Л-I:PO–7	2.2	2.4	2.7	2.2	0.4	0.8
Л-I:PO–8	1.4	1.9	2.4	2.0	0.3	0.6
Л-I:PO–10	2.1	1.2	2.7	2.0	0.4	0.3
Л-I:PO–11	2.2	1.0	2.7	2.7	0.4	0.3

- Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Моделирование развития фитопланктона в Можайском водохранилище// Вестник МГУ, сер.5. География, 2010. №3. С. 43–47.К
- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.
- Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. М.: Высшая школа, 2005. 464 с.
- Поддубный С.А., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2002. 120 с.
- Пуклаков В.В. Математическая модель процессов тепло- и массообмена в стратифицированном водохранилище// Вестник Моск.ун-та, сер.5, География, 1995. №1. С. 22–29.
- Пуклаков В.В. Гидрологическая модель водохранилища. Руководство для пользователей. М.: ГЕОС. 1999. 96 с.
- Пуклаков В.В., Ершова М.Г., Эдельштейн К.К. Синоптическая изменчивость термодинамического состояния водных масс в Рыбинском водохранилище // Метеорология и гидрология, 2013. № 1. С. 79–89.
- Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Расчеты плотностных течений в Можайском водохранилище// Метеорология и гидрология, 2001. №5. С. 94–104.
- Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С. Оценка роли формы водохранилища при параметризации его экологического состояния в экстремальных гидрологических условиях// Метеорология и гидрология, 2016. №8. С. 70–79.
- Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 284 с.
- Чернега С.С. Эффективность реконструкции водохранилищ с целью контроля их эвтрофирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2006. № 4. С. 1–18.
- Эдельштейн К.К. Лимнология. 2-е изд. М.: Юрайт, 2018. 386 с.
- Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В. Управление качеством воды в стратифицированном водохранилище: оценка с помощью математического моделирования// Водные ресурсы, 1996. Т. 23, № 4. С. 489–499.
- Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Соколов Д.И. Интенсивность поступления кислорода из пресных водоемов // Водные ресурсы, 2018. Т. 45, № 3. С. 309–318.
- Chen C.W., Orlob G.T. Ecologic Simulation for Aquatic Environments. In: Patten B.C. (Ed.). Systems Analysis and Simulation in Ecology. Vol.III, Academic Press, New York, 1975, pp. 475–588.
- Edelshtein K.K., Puklakov V.V., Datsenko Y.S., Erina O.N., Sokolov D.I. The Rate of Oxygen Release from Freshwater Bodies//Water Resources, Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 45, № 3, с. 399–408
- Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam, 1971. 256 p.

REFERENCES

- Chen C.W., Orlob G.T. 1975. Ecologic Simulation for Aquatic Environments. In: Patten B.C. (Ed.). Systems Analysis and Simulation in Ecology. Vol.III, Academic Press, New York. pp. 475–588.
- Chernega S.S. 2006. Effektivnost rekonstruktsii vodokhranilishh s tseliu kontrolya ikh evtrofirovaniya //Vodnoe khozaistvo Rossii: problem, tekhnologii, upravlenie. № 4. S. 1–7 [in Russian]
- Gidroeologichesky rezhim vodokhranilishh Podmoskovia (nabludeniya, diagnoz, prognoz). M.: Izd-vo “Pero”. 2015. 286 s [in Russian]
- Grechushnikova M.G. 2014. Rezultuty chislennogo modelirovaniya izmeneniya regima Mozhaiskogo i Istrinskogo vodokhranilishh pri realizatsii stzenaria A2 globalnogo poteplenia//Meteorologiya I gidrologiya. № 3. S. 86–96 [in Russian]
- Datzenko U.S., Puklakov V.V. 2010. Modelirovaniye razvitya fitoplanktona v Mozhaiskom vodokhranilishhe // Vestnik MGU, ser.5. Geographiya. №3. S. 43–47 [in Russian]
- Edelshtein K.K. 2018. Limnology. 2-e izd. M.: Urite. 386 s. [in Russian]
- Edelshtein K.K., Puklakov V.V. 1996. Upravlenie kachestvom vody v stratifitzirovannom vodokhranilishhe: otzenea s pomochhiy matematicheskogo modelirovaniya//Vodnie resursy. T. 23, № 4. S. 489-499. [in Russian]
- Edelshtein K.K., Puklakov V.V., Datsenko Y.S., Erina O.N., Sokolov D.I. 2018. The Rate of Oxygen Release from Freshwater Bodies // Water Resources. V. 45, № 3, p. 399–408
- Kuibishevskoe vodokhranilische (nauchno-informatzionnyi spravochnik). Toliatty: IEVB RAN. 2008. 123 s. [in Russian]
- Mikhailov V.N., Dobrovolsky A.D., Dobrolubov S.A. 2005. Gidrologiya. M.: Visshiya shkola. 464 s. [in Russian]
- Poddubny S.A., Sukhova E.V. 2002. Modelirovaniye vlianiya gidrodinamicheskikh I antropogennikh faktorov na raspredelenie gidrobiontov v vodokhranilishhakh. Rybinsk: Izd-vo OAO “Rybinskii dom pečati”. 120 s. [in Russian]
- Puklakov V.V. 1995. Matematicheskij model protsessov teplo- i massoobmena v stratifitzirovannom vodokhranilishhe//Vestnik Mosk.un-ta, ser.5, Geographiya. № 1. S. 22–29 [in Russian]
- Puklakov V.V. 1999. Gidrologichesky model vodokhranilishha. Rukovodstvo dlya polzovateley. M.: GEOS. 96 s. [in Russian]
- Puklakov V.V., Ershova M.G., Edelshtein K.K. 2013. Sinoptichesky izmenchivost termodinamicheskogo sostoyaniya vodnikh mass v Rybinskom vodokhranilishhe//Meteorologiya I gidrologiya. №1. S. 79–89 [in Russian]

- Puklakov V.V., Edelshtein K.K. 2001. Raschety plotnostnikh techeny v Mozhaiskom vodokhranilishhe// Meteorologija I gidrologija. № 5. S. 94–104 [in Russian]
- Puklakov V.V., Edelshtein K.K., Datsenko U.S. 2016. Otzenka roly formi vodokhranilishha pri parometrizatzii ego ekologicheskogo sostoiania v ekstremalnikh gidrologicheskikh usloviakh// Meteorologija I gidrologija. № 8. S. 70–79 [in Russian]
- Rukovodstvo po gidrologicheskim raschetam pri proektirovanii vodokhranilishh. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 284 s. [in Russian]
- Theil H. 1971. Applied economic forecasting. Amsterdam. 256 p.

EXPERIENCE OF MODELING THE HYDROECOLOGICAL REGIME OF LARGE VOLGA RESERVOIRS

Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov, K. K. Edelstein

Lomonosov Moscow State University

Leninskie gory, 1, Moscow, GSP-1, 119991, yuri0548@mail.ru

Article presents a brief overview of the successful application the reservoir hydrological model for solving various hydroecological problems. The results of model verification using detailed observations are given. The features of adaptation the model for the Rybinsk and Kuibyshev reservoirs of the Volga-Kama cascade are discussed and some results of phytoplankton biomass calculations in the considered reservoirs are presented.

Keywords: Rybinsk and Kuibyshev reservoirs, modeling, hydroecological regime, phytoplankton biomass, model verification