

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 556.114.2:556.55

О.Н. Ерина¹**ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА И КАЧЕСТВА ВОДЫ В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В ЭКСТРЕМАЛЬНО ЖАРКУЮ ПОГОДУ²**

Приводится количественная оценка возможного изменения объема зоны острой гипоксии (с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л) в Можайском водохранилище, головном в Москворецкой системе водоснабжения Москвы, в зависимости от водности и синоптических условий в вегетационный период. Наибольшее внимание уделено особенно неблагоприятным гидрометеорологическим условиям — сочетанию низкого половодья и жаркой антициклональной погоды с малым притоком воды к водохранилищу в меженный период.

Для расчета пространственно-временного распределения растворенного кислорода применена гидрологическая модель водохранилища ГМВ—МГУ, дополненная экологическим блоком. Верификация кислородного блока модели по данным 10 гидролого-гидрохимических съемок показала, что среднеквадратическое отклонение вычисленных в боксах значений содержания растворенного кислорода от его 609 измеренных величин за весь период расчета (361 сут.) составило $\pm 2,1$ мг/л, а средняя ошибка модельного расчета — $-0,6$ мг/л.

Сценарные модельные расчеты показали различия в развитии зоны гипоксии в зависимости от времени наступления жаркой погоды. В средневодный год с жаркой весной и низким половодьем содержание кислорода в водохранилище будет существенно ниже, чем в обычный год со средней водностью из-за слабого развития диатомовых водорослей и раннего наступления устойчивой температурной стратификации, а также из-за уменьшения растворимости растворенного кислорода при высокой температуре воды. Аномально жаркая погода в летний период может привести к появлению обширных зон гипоксии в гипolimнии водохранилища, достигающих 36% от общего объема воды в водоеме и отрицательно влияющих на процессы формирования качества воды в нем.

Ключевые слова: растворенный кислород, гидроэкологическое моделирование, зоны гипоксии, жаркие периоды.

Введение. Содержание растворенного кислорода — одна из важнейших характеристик качества воды водохранилищ, так как служит интегральным показателем продукционно-деструкционных и динамических процессов, протекающих в водных экосистемах. Особенно важна эта характеристика при изучении стратифицированных водоемов в связи с тем, что плотностная стратификация препятствует обмену растворенным кислородом между эпилимнионом, где происходит его продуцирование в результате процесса фотосинтеза, и гиполимнионом, где O_2 расходуется на биохимическое окисление и дыхание. В условиях антициклональной погоды, характеризующейся слабым ветром и высокой температурой воздуха, кислород ниже слоя скачка плотности воды может исчезать полностью, что приводит к появлению восстановительных условий среды в гиполимнии и увеличению интенсивности диффузионного потока биогенных веществ из донных отложений в воду.

Постановка проблемы. Исследование влияния гидрометеорологических условий на водные экосистемы требует проведения трудоемких регулярных наблюдений, отбора и обработки большого количества проб воды. Математическое моделирование позволяет составить представление о возможной реакции водной экосистемы без проведения учащенных полевых работ [4, 8, 9]. Более того, появляется возможность изучить реакцию системы на возникновение тех или иных непредсказуемых гидроклиматических ситуаций [1].

Цель работы — оценить возможное изменение размера зоны острой гипоксии (с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л) в стратифицированном водохранилище в зависимости от водности и синоптических условий за вегетационный период. Наибольшее внимание уделено особенно неблагоприятному сочетанию гидрометеорологических условий — низкое половодье и преобладание жаркой антициклональной погоды с малым притоком воды к водохра-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Краснови́довская учебно-научная база, инженер; e-mail: tamiblack@yandex.ru

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-05-00176) и ФЦП “Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012—2020 годах” (проект 12-фцп-Н5-07).

нилищу в меженный период. Рассмотрено влияние отдельных “жарких” циклов в течение вегетационного периода (жаркая весна, жаркое лето).

Исследования проводились для Можайского водохранилища, которое входит в Москворецкую систему водоснабжения Москвы. Это слабозвтрофный водоем, в котором ежегодно возникающая стратификация в зимний и особенно в летний период способствует истощению запаса кислорода в гипolimнионе вследствие его потребления гидробионтами на дыхание и бактериальную деструкцию органического вещества.

Материалы и методы исследования. Для расчета пространственно-временного распределения растворенного кислорода применена разработанная на кафедре гидрологии МГУ имени М.В. Ломоносова гидрологическая модель водохранилища ГМВ—МГУ [6], дополненная экологическим блоком [3]. Водоем в ней представлен продольной последовательностью его отдельных частей — отсеков, состоящих из вертикальной совокупности однородных по свойствам воды горизонтальных слоев. Гидрологический режим имитируется с шагом 1 сут. по времени и 1 м по глубине. Неоднократное сравнение результатов модельных расчетов режима температуры и электропроводности с детальными данными фактических наблюдений [2, 7, 10] свидетельствует о высоком качестве воспроизведения блоком теплообмена модели ГМВ—МГУ этих характеристик водных масс в водохранилище. Именно этот факт сделал возможным дальнейшее совершенствование и оснащение модели экологическим блоком, в котором в числе прочих характеристик качества воды (ХКВ) рассчитывается содержание растворенного кислорода.

Переменная “растворенный кислород” (РК) относится к наиболее сложным (как по блок-схемам внутриводоемных связей, так и по формализациям внутриводоемных процессов) элементам имитационного моделирования экосистем. В блоке ГМВ—МГУ при вычислении концентрации РК учитываются следующие процессы: 1) поступление и отток РК в результате процессов водообмена; 2) продукция кислорода во время фотосинтеза; 3) потребление РК в результате процессов нитрификации; 4) потребление РК при разложении детрита; 5) потребление РК при дыхании зоопланктона; 6) потребление РК при дыхании рыб; 7) потребление РК на окисление стойкого и лабильного органического вещества; 8) потребление РК на окисление восстановленных веществ; 9) потребление РК донными отложениями.

Параметризация процессов выделения кислорода в процессе фотосинтеза проводилась по фитопланктонному блоку модели, обмен с атмосферой — по эмпирической связи со скоростью ветра, а потребление растворенного кислорода — по кинетическим уравнениям реакции 1-го порядка [12]. На первом этапе расчетов выполнялся подбор коэффициентов кислородного блока. Для этого использовали приводимые в литературе по экологическому моделированию зна-

чения коэффициентов, которые затем корректировали по результатам первичной верификации модели.

Верификация кислородного блока ГМВ—МГУ проведена по данным 10 гидролого-гидрохимических съемок, выполненных в течение 1984 г. примерно через равные промежутки времени с частотой станций наблюдения, равной 1 станция на 0,5 км² акватории водоема [11]. Водохранилище площадью 30,7 км² и длиной 28 км схематизировано 18-ю расчетными отсеками. Статистическая оценка результатов верификационного расчета показала, что среднеквадратическое отклонение вычисленных в боксах значений содержания растворенного кислорода от 609 его измеренных величин за весь период расчета (361 сут.) составило $\pm 2,1$ мг/л, а средняя ошибка модельного расчета — $-0,6$ мг/л. Такая оценка свидетельствует о вполне адекватном отображении моделью кислородного режима водохранилища в течение всего годового цикла.

Наибольшая погрешность расчета получена для половодья, когда в водоеме наиболее интенсивны динамические процессы. После схода льда увеличивается скорость повышения температуры воды и усиливается ее конвективное перемешивание до достижения температуры в водоеме ~ 4 °С, этот процесс в течение нескольких дней охватывает весь водоем.

В вегетационный период расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями РК могут быть вызваны погрешностями в расчете биомассы фитопланктона. По результатам моделирования в 1984 г. не обнаружены ярко выраженные всплески цветения, тогда как по данным наблюдений прослеживается рост содержания растворенного кислорода в поверхностном горизонте в мае и июне до 10 мг/л и более. Однако при оценке качества моделирования следует учитывать, что цветение водорослей в водоеме распределено пятнами. Данные съемок, по которым проводится верификация модели, представляют собой наблюдения в отдельных точках плесов, тогда как в результатах расчета для каждого горизонта (в модели — бокса) выдается среднее значение характеристики для всей площади расчетного отсека.

Модельное исследование влияния аномальных гидрометеорологических условий на режим кислорода состояло в двух сценарных расчетах пространственного распределения кислорода в водохранилище при следующих условиях.

В качестве исходных данных для обоих сценариев использованы реальные гидрометеорологические ряды, скомпонованные с необходимыми для расчетов данными. За основу взят средний по водности 2006 г. По кривой обеспеченности объема весеннего половодья р. Москва для расчетов выбрано очень маловодное половодье 2007 г. объемом 62,6 млн м³ (обеспеченность 98%).

Выбор “жарких” периодов основан на анализе данных метеостанции г. Можайск. Для сценариев выбраны и скомпонованы декады с самыми высокими значениями температуры, наблюдавшимися на мете-

останции за весь полувековой период существования Можайского водохранилища (таблица). Выбранные периоды характеризуются антициклональной погодой, практически полным отсутствием осадков и малым речным притоком.

Расходы рек Москва и Лусьянка, питающих водохранилище, задавались в соответствии с наблюдаемыми расходами воды в выбранные декады. Ежедневные ряды значений температуры и электропроводности, используемые для расчета плотности воды в притоках, задавались по установленным ранее закономерностям связи с расходами и температурой воздуха. Химико-биологические показатели (концентрация РК, содержание биогенных и органических веществ, биомасса фитопланктона) получены по результатам обобщения многолетних данных наблюдений. Режим сработки полезного объема водохранилища для всех вариантов расчета задавался с учетом диспетчерских правил работы Можайского гидроузла [5].

В расчетах использованы *сценарий 1* — сочетание гидрографа притока среднего по водности года с низким половодьем и жаркой весной (май), а также *сценарий 2* — тот же гидрограф и жаркое лето с начала июня до конца второй декады августа.

Ход уровня воды в Можайском водохранилище и суммарный приток воды с водосбора Можайского водохранилища в 2006 г. и по выбранным сценариям показан на рис. 1.

Результаты исследований и их обсуждение. При прохождении половодья с малым объемом на месяц раньше, чем в средневодном году, водная толща может прогреваться до 6 °С к концу апреля, тогда как в расчетном 2006 г. температура воды в последнем отсеке составляет всего ~2 °С по всей вертикали (рис. 2, а). Вертикальное распределение содержания растворенного кислорода в приплотинном районе Можайского водохранилища указывает на то, что в этот период уже может начаться развитие диатомовых водорослей, вызывающее повышенное содержание РК в поверхностном горизонте 30 апреля.

В случае реализации сценария 1 (рис. 2, б), при котором чрезвычайно низкое половодье сочетается с установлением жаркой погоды в мае, в этот период может произойти быстрый прогрев эпилимниона. В таком случае в конце мая различие температуры в поверхностном слое приплотинного отсека может превышать 10 °С по сравнению с расчетным 2006 г.

(рис. 2). Быстрое увеличение температуры воды в мае в свою очередь приведет к менее активному развитию диатомовых водорослей в связи с неблагоприятными для них температурными условиями. Таким образом, в средневодном году весенний период в Можайском водохранилище может быть в 2 раза продуктивнее, чем в год с низким половодьем и жаркой весной (максимальная общая биомасса фитопланктона в мае 2006 г. в приплотинном районе водохранилища по расчетам составляет 7,2 мг/л, тогда как по сценарию 1 — 3,7 мг/л). По этой причине содержание РК в поверхностном горизонте по сценарию 1 может быть на 2 мг/л меньше, чем в 2006 г. Однако уже к концу июня различия между расчетом и сценарием 1 в вертикальном распределении температуры и содержания растворенного кислорода в приплотинном отсеке практически полностью исчезают и больше не возникают вплоть до конца вегетационного периода.

При реализации сценария 2 (рис. 2, в), несмотря на изменившиеся метеорологические и гидрологические характеристики периода половодья, в мае не будет происходить столь интенсивный прогрев воды, вертикальные эпюры температуры воды сценарного и диагностического расчетов в конце месяца практически идентичны. С наступлением жаркой погоды в начале июня различия температуры воды между расчетом и сценарием 2 постепенно возрастают и становятся наиболее выраженными в конце июля: устойчивая плотностная стратификация, сохраняющаяся при антициклональной погоде на протяжении 2 мес., приведет к исчезновению растворенного кислорода уже на глубине 8 м в приплотинном отсеке, тогда как по расчету в 2006 г. концентрация стремилась к нулю на глубине 14 м и ниже. В верховьях и среднем районе водохранилища возникновение гидрометеорологических условий, аналогичных сценарию 2, может привести к полному исчезновению растворенного кислорода ниже верхней границы слоя температурного скачка. При этом активного развития фитопланктона в жаркий летний период может не происходить в связи с радиационным подавлением роста водорослей. По этому сценарию окончание периода жаркой антициклональной погоды приходится на 20 июля, после чего погода изменяется на циклональную, происходит ветровое перемешивание водной толщи и обогащение ее растворенным кислородом в результате аэрации. К концу августа в приплотин-

Метеорологические характеристики наиболее жарких декад в вегетационный сезон, использованные для сценарных расчетов

Среднедекадные метеорологические характеристики	Сценарий 1			Сценарий 2							
	май			июнь			июль			август	
Декада	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Год	1996	1975	2007	1986	1999	1999	1999	2010	2010	2010	2010
Температура, °С	16,7	18,2	21,9	20,7	22,5	22,6	22,5	25,0	26,6	26,7	22,3
Сумма осадков, мм	16,9	4,4	6,1	9,2	12,9	1,8	2,8	0	6	0	12

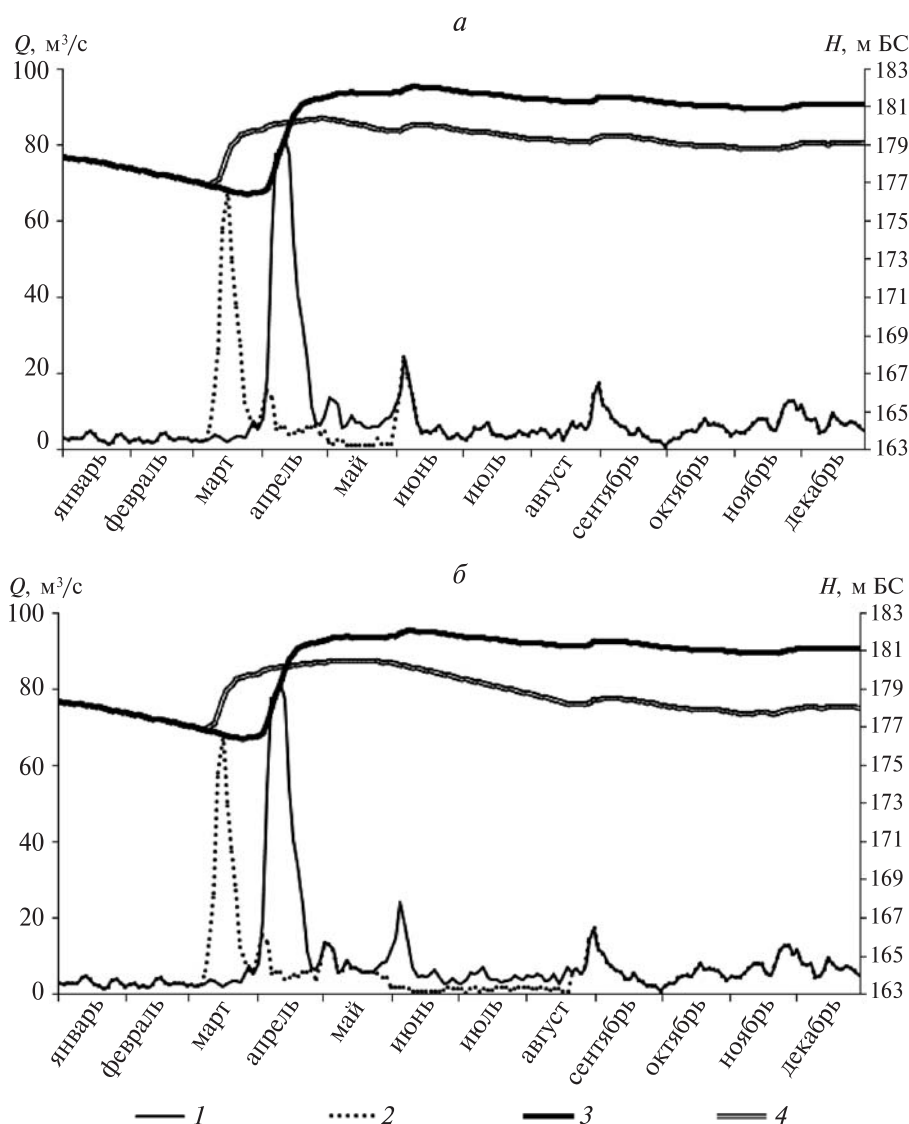


Рис. 1. Суммарный приток воды в Можайское водохранилище и ход уровня в 2006 г. (1, 3) и по сценарию 1 (2, 4) (а) и такой же суммарный приток воды в Можайское водохранилище и ход уровня в 2006 г. (1, 3) и по сценарию 2 (2, 4) (б)

ном отсеке полного перемешивания водной толщи еще не будет, что обусловлено большой глубиной.

Изменение объема зоны гипоксии в течение вегетационного периода по результатам диагностического и сценарных расчетов представлено на рис. 3. На графике видно, что колебания величины объема зоны гипоксии с содержанием РК < 2 мг/л в 2006 г. и при реализации сценария 1 могут происходить квазисинхронно. При этом обедненные растворенным кислородом водные массы в Можайском водохранилище в случае сочетания низкого половодья с жаркой весной будут, вероятно, занимать меньший объем, чем в средневодном году. Это объясняется разницей в объеме половодий, что в результате отражается на ходе уровня (рис. 1) и толщине гипolimниона — чем выше уровень, тем больше толщина этого слоя, а следовательно, и его объем. Возникновение пиков на графике — следствие гидрометеорологических условий за вегетационный период — при кратковременных похолоданиях, сопровождающихся большой скоростью

ветра, происходит разрушение плотностной стратификации и обогащение водной толщи растворенным кислородом. Это приводит к уменьшению объема зоны гипоксии, однако при последующем установлении погоды антициклонального типа поступающий кислород довольно быстро расходуется на окисление органического вещества и дыхание биоты.

При реализации сценария 2 из-за меньшего объема водохранилища по сравнению с расчетным 2006 г. и малого притока в течение всего летнего периода зона гипоксии может достигать 36% от объема водохранилища, что соответствует доле объема гипolimниона в общем объеме Можайского водохранилища в конце жаркого летнего периода.

Выводы:

— экологический блок гидрологической модели водохранилища позволяет адекватно воспроизводить пространственно-временные изменения содержания растворенного кислорода в стратифицированном Можайском водохранилище и представляет собой эф-

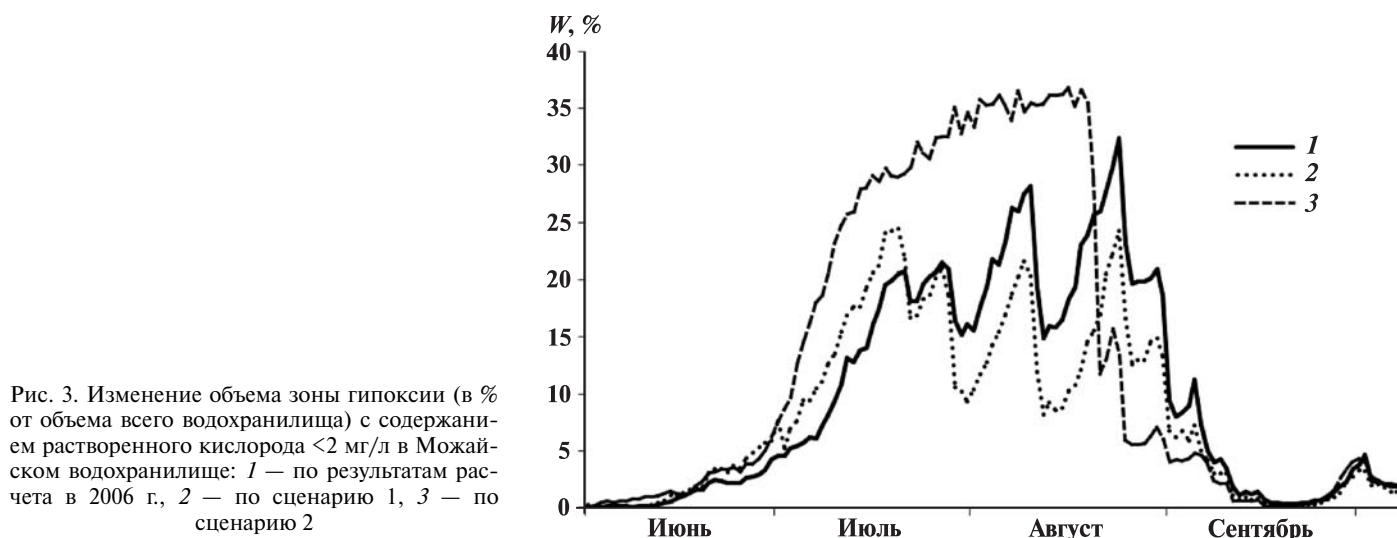


Рис. 3. Изменение объема зоны гипоксии (в % от объема всего водохранилища) с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л в Можайском водохранилище: 1 — по результатам расчета в 2006 г., 2 — по сценарию 1, 3 — по сценарию 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречушникова М.Г., Эдельштейн К.К. Возможные климатические изменения гидрологического режима в Рыбинском водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 6. С. 61—68.
2. Гречушникова М.Г., Эдельштейн К.К. Формирование синоптического и сезонного слоев температурного скачка в пресном водоеме // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2004. № 3. С. 31—38.
3. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Моделирование развития фитопланктона в Можайском водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 3. С. 43—47.
4. Йоргенсен С.Э. Управление озерными системами. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.
5. Основные положения правил использования водных ресурсов водохранилищ Москворецкой водной системы. М.: Минводхоз РСФСР, 1968. 38 с.
6. Пуклаков В.В. Гидрологическая модель водохранилища: руководство для пользователей. М.: ГЕОС, 1999. 96 с.
7. Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Расчеты плотностных течений в Можайском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2001. Т. 26, № 5. С. 94—104.
8. Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 376 с.
9. Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С. Лимнологическое моделирование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 82 с.
10. Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Экспериментальная оценка погрешности модельного расчета стратификации водной толщи в водохранилище // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2005. № 6. С. 20—24.
11. Эдельштейн К.К., Еришова М.Г., Пуклаков В.В. Моделирование гидрологической структуры долинных водохранилищ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1989. № 2. С. 50—58.
12. Cole T., Buchak E. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, vers. 2.0 // Techn. Rep. EI-95-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1995.

Поступила в редакцию
13.03.2014

O.N. Yerina

PROGNOSTIC EVALUATION OF CHANGES OF THE OXYGEN REGIME AND WATER QUALITY IN THE MOZHAISK RESERVOIR UNDER EXTREMELY HOT WEATHER

Quantitative assessment of possible changes of the hypoxia zone (with dissolved oxygen concentrations less than 2 mg/l) depending on water amount and synoptic conditions of the vegetation season was carried out for the Mozhaik reservoir, the main element in the Moskva River water supply system of Moscow. Particular attention was given to the analysis of unfavorable hydrometeorological situations, such as combination of the low level of seasonal flood, hot anticyclone weather and small water input into the reservoir during the low-flow period.

The spatial-temporal pattern of dissolved oxygen distribution was calculated using the hydrological model of the reservoir (GMV—MGU) with additional ecological unit. The oxygen unit of the model was verified basing on the data of 10 hydrological-hydrochemical surveys. Standard deviation of calculated values of dissolved oxygen concentrations from 609 measurements during the whole period of modeling (361 days) was $\pm 2,1$ mg/l and mean absolute error of model calculation was $-0,6$ mg/l.

Scenario model calculations revealed different parameters of the hypoxia zone in relation to the timing of hot weather. A combination of medium flow, hot spring and low seasonal flood results in much lower oxygen concentrations in the reservoir as compared to a typical medium-flow year, because of the small amount of diatoms, earlier formation of stable thermal stratification and lower concentrations of dissolved oxygen under high water temperatures. Extremely hot summer weather may cause the formation of vast hypoxia zones in the hypolimnion layer (up to 36% of the total water amount) and affect water quality in the reservoir.

Key words: dissolved oxygen, hydroecological modeling, hypoxia zones, hot waves.