

УДК 556.5(282.247.416.8)

ДЛИННОВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОД ВОДОХРАНИЛИЩА СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

© 2011 А.В. Рахуба

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти.

Поступила 03.03.2011

Рассматриваются особенности формирования качества вод водохранилища руслового типа суточного регулирования. Приведены результаты натурных наблюдений и моделирования суточной и пространственной динамики гидрологических и гидрохимических характеристик Саратовского водохранилища. На основе полученных результатов проведена оценка изменчивости качества вод в зоне влияния попусков ГЭС.

Ключевые слова: гидродинамический и гидрохимический режимы, качество воды, моделирование.

Экологические проблемы водохранилищ включают целый комплекс аспектов, среди которых ведущую роль играют вопросы, связанные с динамикой и качеством вод. В отличие от естественных природных водоемов водохранилища являются сложными природно-техническими системами с неустановившимся гидродинамическим режимом, который определяет изменчивость пространственной структуры качества вод во времени. Интенсивные колебания скорости и разнонаправленность течений на водохранилищах, обусловленные режимом работы гидроэлектростанций, непосредственно влияют на процессы накопления и распространения в воде примесей, осложняя наблюдения и контроль экологического состояния природных вод. В связи с этим регулирование стока гидроузлами следует рассматривать как мощный антропогенный фактор, влияющий на водообмен в водохранилище, в результате чего качество воды может существенно изменяться.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩ

Создание водохранилищ привело к изменению гидрологического режима рек и появлению многообразных динамических явлений, вызванных регулированием стока на гидроузлах. К числу таких явлений относятся длинные волны, параметры которых определяются планом эксплуатации водохранилища и видом регулирования стока.

Специфика гидродинамического режима водохранилищ в литературе отмечается многими авторами. К настоящему времени интересные исследования процессов длинноволновой динамики на Куйбышевском и Саратовском водохранилищах были проведены П.Ф. Чигиринским [8, 9] и А.Н. Коняевым [9]; на Рыбинском и Горьковском – Н.В. Буториным [1], А.С. Литвиновым [3], Н.А. Ярославцевым [10]; на водохранилищах Камы – Ю.М. Матарзиным [4], И.К. Мацкевичем [4, 5]; и др. В каскаде водохранилищ наибольшие изменения отмечаются в характере распределения уровней воды,

уклонов водной поверхности, скоростей течения и расходов.

Суточный и недельный режимы работы ГЭС создают колебания уровня различной амплитуды и периодичности. Такие колебания уровня в значительной мере определяются прохождением по водохранилищу длинных волн, которые в зависимости от направления их движения могут быть как прямые, так и обратные. Прямая волна образуется в результате колебания расхода воды на входном створе ГЭС и распространяется по направлению, совпадающему с основным стоковым течением. Скорость перемещения гребня прямой волны зависит от глубины и морфометрии водохранилища и по разным оценкам составляет от 15 до 40 км/ч. Достигая замыкающего створа и отражаясь от плотины станции нижерасположенной ГЭС, прямая волна трансформируется в обратную, перемещаясь вверх против течения. Скорость такой волны составляет от 30 до 40 км/ч. Появление обратной волны так же может произойти и в результате колебания уровня воды в верхнем бьефе, вызванного неравномерной работой замыкающей ГЭС.

Распространяясь навстречу друг другу, прямые и обратные волны накладываются и создают сложный колебательный режим уровня воды. Амплитуда колебаний уровня может усиливаться явлением резонанса, когда период свободных колебаний волн совпадает с периодом вынужденных колебаний за счет сбросов воды на ГЭС.

Нестабильное состояние водной поверхности водохранилища так же сопровождается постоянными колебаниями скорости течения. Так, при увеличении расходов воды на ГЭС в водохранилище наблюдается только прямой уклон и усиление основного стокового течения. Когда расходы снижаются, то и скорости так же снижаются. При определенных условиях образуется устойчивый обратный уклон с появлением возвратного стокового течения.

Особый интерес представляет распределение скорости течения по глубине. Как отмечают многие авторы [2, 4], при прохождении прямой волны попуска в период интенсивного увеличения скоростей течения наблюдается значительное превышение

Рахуба Александр Владимирович, к.т.н., с.н.с., e-mail: raha-vum@mail.ru

абсолютной величины придонных скоростей над поверхностными. При прохождении обратной волны, когда течение уменьшается, интенсивность снижения поверхностных скоростей становится значительно меньше, чем придонных.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНЫХ МАСС И СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАЧЕСТВА ВОД САРАТОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Среди всей совокупности динамических явлений основным фактором, определяющим изменчивость гидрологических и гидрохимических компонентов на Саратовском водохранилище, является неравномерный режим работы Жигулевской и Балаковской ГЭС. Оба этих гидроузла осуществляют попуски воды в суточном и недельном режиме.

Амплитуда суточных колебаний уровня воды в нижнем бьефе составляет 1,5 – 2,0 м, в верхнем – 0,15 – 0,3 м. Эти колебания вызывают формирование прямой и обратной волн, которые, распространяясь навстречу друг другу, в течение суток в центральной части водохранилища создают длинноволновые колебания уровня воды и скорости течения с двумя максимумами и двумя минимумами (рис. 3 и рис. 4). Такой неустановившийся режим колебаний отражается на процессах образования и движения водных масс.

Важно отметить, что длинные волны не только определяют динамику водных масс в водохранилище, но и изменяют естественный гидрологический режим в устьевых участках боковых притоков. Во время прохождения гребня волны часть воды водохранилища поступает и накапливается в устьевых зонах. После того, как уровень падает и подпор ослабевает, порции речных водных масс поступают в водохранилище, где сносятся течением и смешиваются с основной водной массой водохранилища.

Чтобы проследить влияние длинноволновой динамики на гидрохимический режим нами были проведены суточные наблюдения в трех характерных местах Саратовского водохранилища: I – верхний створ (условно фоновый) в пос. Зольное; II – средний створ (локального влияния притока), расположенный ниже впадения р. Самара в совх. Масленникова; III – нижний створ (смешения водных масс) в пос. Печерское (рис. 1). На трех вертикалях, по одной на каждом из указанных створов, расположенных на расстоянии 50 - 70 м от берега, на глубине 3 м от дна проводились измерения скорости потока, уровня воды и гидрохимических показателей.

Измерения скоростей течения были выполнены гидрометрической вертушкой ГР-21. Колебания уровня и качество воды определялись с использованием датчика давления и гидрохимических датчиков зонда «DS-5X». Вертушка и зонд фиксировались на одном водном горизонте с помощью груза и поплавков. Запись данных скорости потока осу-

ществлялась через каждый оборот лопастного винта вертушки, а уровня и гидрохимических показателей с дискретностью 1 мин в течение суток. Дополнительно проводилось зондирование поперечного поверхностного слоя воды по температуре (Т) и удельной электропроводности (УЭП) зондом «Нитон».



Рис. 1. Схема расположения створов наблюдения на Саратовском водохранилище

На рис. 2-4 приведены графики суточной изменчивости гидрологических и гидрохимических характеристик на трех основных створах. В нижнем бьефе в фоновом створе I пос. Зольное качество воды полностью определяется водной массой приплотинной части Куйбышевского водохранилища. Вследствие неравномерной работы Жигулевской ГЭС динамический режим в этом районе крайне неустойчив. Амплитуда колебаний скорости потока изменяется в пределах 0,01-1,02 м/с с периодом 1-2 часа и характерна для дневных и вечерних часов суток. В ночные и утренние часы уровень воды и колебания скорости снижаются. При этом в течение суток существенных изменений качества воды не прослеживается. Из всех регистрируемых характеристик можно отметить значительное превышение мутности, приходящееся на дневное время, а также суточное изменение показателей температуры воды и содержания растворенного кислорода, которые связаны с прогревом водной толщи днем и охлаждением ночью (рис. 2).

Наиболее хорошо прослеживается суточная изменчивость качества воды в створе II совх. Масленникова, выбранного 5 км ниже впадения р. Самара. Отклонения гидрохимических показателей от фоновых значений в этом районе определяются влиянием водной массы р. Самара, поступающей в Саратовское водохранилище в ночные часы, когда уровень воды в водохранилище снижается. Попадающий в водохранилище объем речной воды распространяется вдоль левого берега с гидрологическим фронтом, проходящим по середине русла, ширина которого составляет 400 м (рис. 5). Затем при повышении уровня и появлении подпора со стороны водохранилища разгрузка вод притока прекращается, и значения концентраций ряда показателей начинают снижаться.

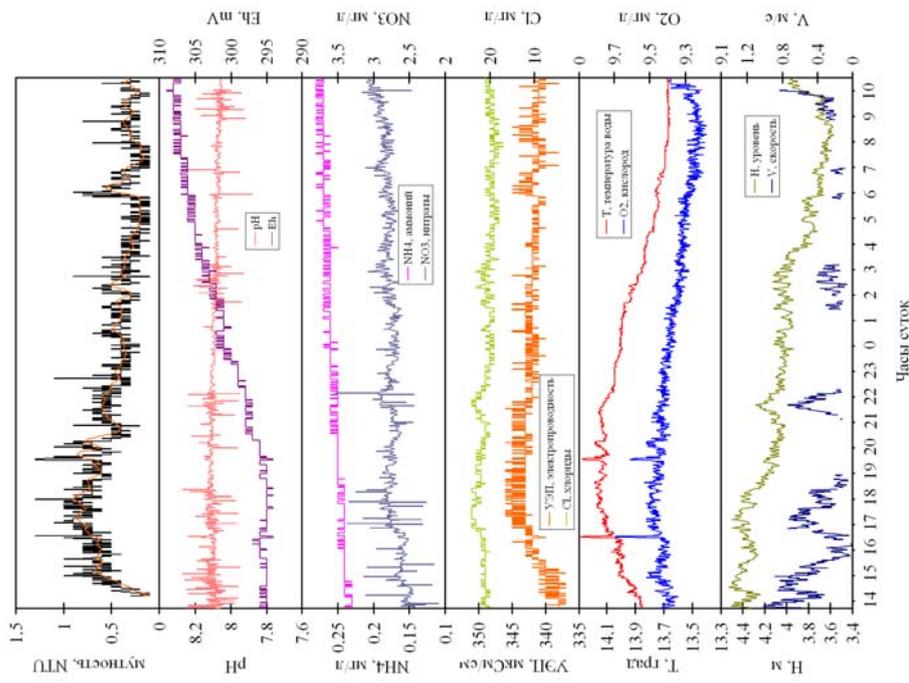


Рис. 2. Суточная изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик на вертикали створа I пос. Зольное 9 - 10.06.2008 г.

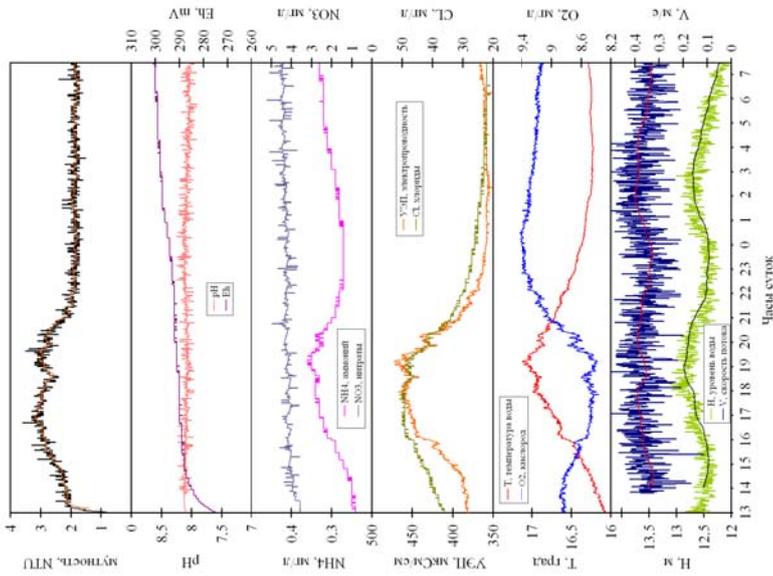


Рис. 3. Суточная изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик на вертикали створа II совх. Масленникова 16 - 17.06.2008 г.

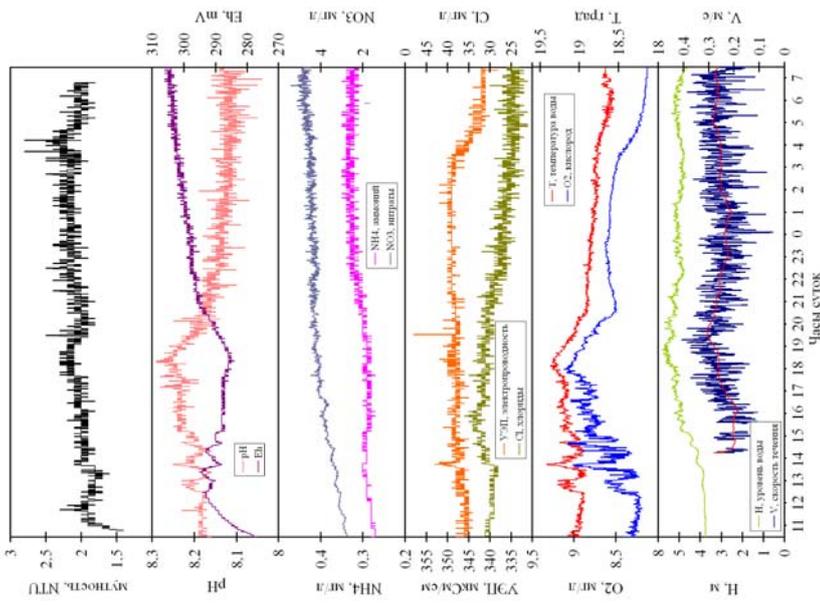


Рис. 4. Суточная изменчивость гидрологических и гидрохимических характеристик на вертикали створа III пос. Печерское 25 - 26.06.2008 г.



Рис. 5. Поперечный разрез УЭП в поверхностном слое воды в створе II совх. Масленникова на 5 часов 17.06.2008 г.

По данным наблюдений превышения концентраций Cl , NH_4 , УЭП, Т, мутности и снижение O_2 в створе II отмечается с 16 до 20 часов. Снижение концентрации растворенного в воде кислорода, не свойственное этому времени суток, является фактически свидетельством локального загрязнения в этом районе (рис. 3).

В районе створа III пос. Печерское водные массы всех крупных притоков, поступающие из выше расположенных участков, частично или полностью смешиваются. Синхронные флуктуации Т, рН, Eh и O_2 на графике суточного хода (рис. 4), возникающие днем, свидетельствуют о периодическом появлении струйности течения и вихревых образований. По характеру суточной изменчивости здесь уже прослеживаются преимущественно мелкомасштабные неоднородности, связанные с присутствием трансформированных водных масс боковой приточности.

В целом анализ суточных данных измерений показывает высокий уровень изменчивости гидродинамических и гидрохимических показателей. Амплитуда колебаний Т, рН, Eh, УЭП, NH_4 , NO_3 , Cl и O_2 на вертикалях каждого створа изменяется в пределах 3-59 %.

В створе I изменения значений этих показателей составляют 3-29%. Наибольшие колебания 4-59% наблюдаются в створе II. Изменения амплитуды колебаний мутности составляют 78-96% с максимумом в створе III. Для гидрологических характеристик скорости течения и уровня воды изменения амплитуды колебаний составляют 8-99%, достигая наибольших значений в створах I и II.

Как видно на рис. 2-4 динамика гидрологических и гидрохимических показателей в течение суток имеет пульсирующий характер. В табл. 1 представлены статистические параметры суточной изменчивости всех изучаемых характеристик. Диапазон изменений величин C_v для гидрохимических показателей составляет 0,01-0,48, для скорости течения и уровня воды составляет 0,02-0,57. Концентрации осредненных за сутки величин в створе

совх. Масленникова в сравнении с фоновым створом пос. Зольное увеличиваются для УЭП на 48 мкСм/см (14%), NH_4 – на 0,04 мг/л (15%), NO_3 – на 1,46 мг/л (53%), Cl – на 12,5 мг/л (60%) и мутности – на 1,74 NTU (378%). В створе смешения пос. Печерское превышения концентраций составляют соответственно для УЭП 5 мкСм/см (1,5%), NH_4 – 0,05 мг/л (19%), NO_3 – 1,33 мг/л (48%), Cl – 7,6 мг/л (37%) и мутности – 1,64 NTU (356%).

Таким образом, в характерных районах Саратовского водохранилища (нижний и верхний бьефы ГЭС, русловые и пойменные участки, участки впадения боковых притоков, районы сброса сточных вод и др.) формируются зоны с различной степенью изменчивости показателей качества воды. Пространственные размеры, геометрия и время существования таких зон напрямую связаны с режимом работы гидроузлов.

Проведенные исследования позволили выделить зоны качества вод различного масштаба. Крупномасштабная зона (более 10 км²) образуется в результате попусков ГЭС, химический состав которой определяется приплотинной водной массой вышележащего водохранилища. Наиболее ярко выражены мезомасштабные зоны (от 1 до 10 км²). Они формируются водными массами средних и крупных боковых притоков с типичной суточной периодичностью и существуют в водохранилище 1 – 2 суток. Зоны меньшего масштаба (менее 1 км²) образуются от малых притоков и точечных источников загрязнения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИМЕСИ В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

На основе собранных данных суточных расходов воды на ГЭС и гидрохимических измерений в характерных районах водохранилища был проведен ряд численных экспериментов на двумерных (плановых) математических моделях Саратовского водохранилища. Разработка моделей осуществлялась с использованием программной системы «ВОЛНА» [6,7].

Таблица 1. Статистические параметры данных наблюдений гидрологических и гидрохимических показателей в створах I – III

показатель	пос. Зольное				совх. Масленикова				пос. Печерское									
	\bar{u}	δ	C_v	max	min	$\Delta, \%$	\bar{u}	δ	C_v	max	min	$\Delta, \%$						
T, град	13,9	0,17	0,01	14,3	13,7	4,2	16,5	0,27	0,02	17,12	16,07	6,1	18,6	0,26	0,02	19,19	18,13	5,5
pH	8,09	0,04	0,01	8,27	7,88	4,7	8,08	0,05	0,01	8,25	7,9	4,2	8,17	0,05	0,01	8,29	8,04	3,0
Eh, mV	301	4,72	0,02	309	294	4,9	293	5	0,02	301	275	8,6	295	6,46	0,02	306	277	9,5
УЭП, мкСм/см	342	1,66	0,01	346	337	2,6	390	38	0,1	473	349	26,2	347	2,48	0,01	358	338	5,6
NH ₄ , мг/л	0,26	0,01	0,05	0,28	0,23	17,9	0,3	0,03	0,1	0,36	0,24	33,3	0,31	0,02	0,07	0,35	0,27	22,9
NO ₃ , мг/л	2,76	0,13	0,05	3,53	2,09	40,8	4,22	0,22	0,05	5,21	3,52	32,4	4,09	0,55	0,14	5,42	2,69	50,4
Cl, мг/л	20,8	1,46	0,07	24	17	29,2	33,3	10	0,31	51	21	58,8	28,4	2,98	0,11	36	21	41,7
O ₂ , мг/л	9,37	0,08	0,01	9,69	9,18	5,3	8,99	0,33	0,04	9,44	8,36	11,4	8,88	0,18	0,02	9,33	8,51	8,8
O ₂ , %	91	1,14	0,01	95	89	6,3	92	3	0,03	96	87	9,4	95	2,38	0,03	100,7	90,3	10,3
мутность, NTU	0,46	0,22	0,48	1,3	0,1	92,3	2,2	0,5	0,22	3,6	0,8	77,8	2,1	0,45	0,22	5,1	0,2	96,1
H, м	4,03	0,25	0,07	4,53	3,57	21,2	12,6	0,19	0,02	13,13	12,03	8,4	4,84	0,52	0,11	5,81	3,73	35,8
V, м/с	0,37	0,21	0,57	1,02	0,01	99,0	0,36	0,06	0,17	0,5	0,11	78,0	0,25	0,06	0,22	0,41	0,05	87,8

Примечание: \bar{u} – среднесуточное значение данных наблюдений, δ – среднеквадратическое отклонение, C_v – коэффициент вариации, max и min – максимальные и минимальные значения ряда наблюдений, Δ – изменчивость характеристик $\Delta = 100 \cdot (\text{max} - \text{min}) / \text{max}$.

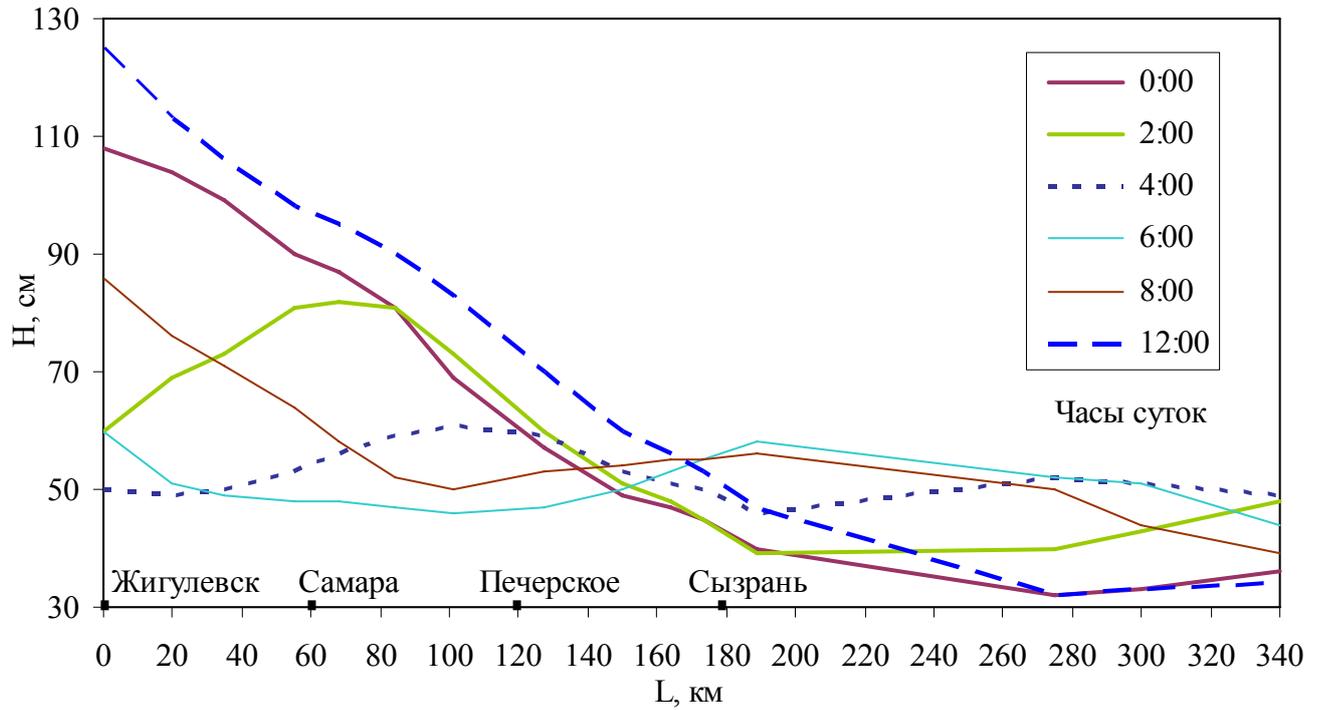


Рис. 6. Продольный профиль водной поверхности Саратовского водохранилища (H – уровень воды над нулем графика)

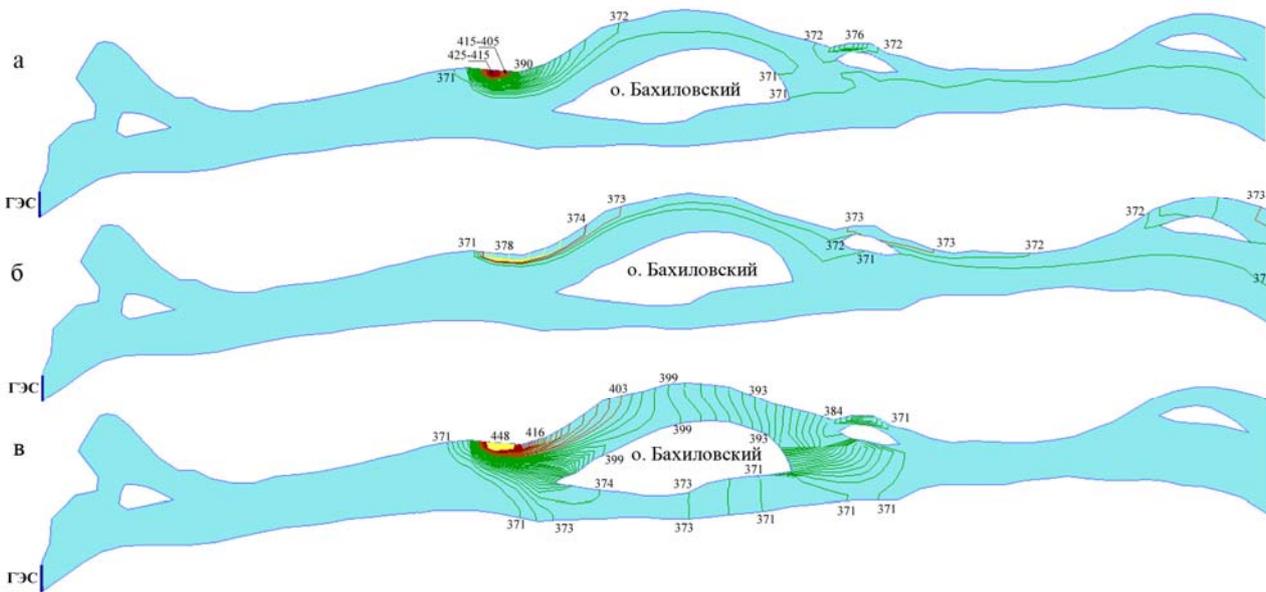


Рис. 7. Распространение сточных вод г. Тольятти в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС в мкСм/см: а – в ночные часы суток, б – в дневные и вечерние часы суток, в – во время санитарных пусков

Для оценки пространственно-временной неоднородности качества вод в условиях неустановившегося гидродинамического режима были смоделированы длинноволновые колебания уровня воды, типичные для Саратовского водохранилища (рис. 6).

В первом случае рассчитывалась динамика примеси от источника сброса сточных вод г. Тольятти, расположенного в нижнем бьефе в 8 км от Жигулевской ГЭС (рис. 7). Расчеты на модели показали, что в период летне-осенней межени максимальная зона загрязнения от источника сброса сточных вод г. Тольятти формируется во время продолжительных санитарных попусков и занимает площадь 5 км². В суточном режиме работы ГЭС в дневные и вечерние часы зона загрязнения составляет 0,5 км², а в ночные часы увеличивается до 1 км². В маловодную фазу гидродинамического режима идет увеличение зон загрязнения в районах сброса, тогда как в многоводную они сносятся ниже от источника возросшим стоковым течением.

Вторая серия модельных экспериментов была проведена по расчету распространения водных масс притоков р. Сок, р. Самара, р. Сухая Самарка, р. Чапаевка и р. Безенчук. Согласно указанным особенностям длинноволновой гидродинамики, впадающие в Саратовское водохранилище водные массы от этих притоков формируют две масштабные зоны неоднородности качества воды. Первая крупная зона образуется под влиянием р. Сок, вытягивается в длину на расстояние 16 – 20 км по всей ширине русла и проходит через акваторию, прилегающую к левому берегу г. Самара за 10 часов. Спустя сутки, к 20-22 часам, водные массы р. Сок, частично смешанные с основной водной массой, достигают границы впадения р. Самара и сливаются с ней, образуя вторую зону неоднородности, которая вытягивается вдоль прилегающей поймы на расстояние 25 – 30 км по всей ширине русла, где в нее (по ходу ее движения) добавляются водные массы рек Сухой Самарки, Чапаевки и Безенчук. На вторые сутки водные массы притоков достигают створа полного смешения в районе пос. Печерское.

В третьей серии численных экспериментов моделировался колебательный характер течения в устье р. Сок (изменчивость скорости и направления течения в зоне выклинивания подпора) и оценивалась интенсивность поступления водных масс в Саратовское водохранилище в зависимости от длинноволнового режима. Модельные расчеты позволили получить детальную картину режима формирования водной массы в зоне переменного подпора устья притока, а так же рассчитать динамику ее движения в условиях суточных колебаний стока (рис. 8)

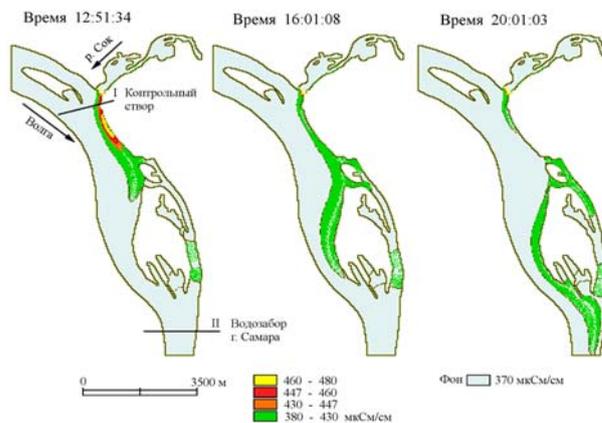


Рис. 8. Расчет на модели распространения вод р. Сок в Саратовском водохранилище

Установленная в результате моделирования неоднородная пространственная структура качества вод Саратовского водохранилища показывает, что неустановившийся гидродинамический режим не только не способствует равномерному распределению гидрохимических показателей, но, наоборот, создает условия для формирования локальных зон с ярко выраженной неоднородностью качества вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение процессов динамики и гидрохимии вод Саратовского водохранилища показало, что неустановившийся длинноволновый режим колебаний характеристик течений приводит к формированию разномасштабных зон, отождествляемых с пространственно-временными неоднородностями качества вод. Пространственное распределение показателей качества вод зависит, как от местоположения источников примеси и боковых притоков, так и от времени прохождения прямых и обратных волн попусков.

В районах впадения притоков размах колебаний по ряду химических показателей существенно выше, чем в других частях водохранилища. Максимумы распределения концентрации в этих районах связаны с режимом уровня и могут быть обусловлены наличием ингредиентов антропогенного происхождения, которые поступают из притоков в ночные часы суток и затем трансформируются под действием основного течения.

Выполненные расчеты на моделях показывают, что суточные попуски воды с ГЭС оказывают значительное влияние на динамику водных масс, а также на скорость и направление перемещения шлейфа загрязняющих веществ и ход их разбавления. В маловодную фазу гидродинамического режима идет увеличение зон неоднородностей качества вод в районах их формирования, а в многоводную они сносятся возросшим стоковым течением.

Следует отметить, что в условиях длинноволновых попусков на ГЭС проведение гидрохимической съемки без предварительного определения масштабов зон загрязнения нельзя считать достаточно

обоснованным. Неучет особенностей динамики примеси водохранилищ может привести к искажению пространственной оценки показателей качества воды. В этом случае, использование моделей позволяет достоверно оценить границы распространения примеси в разные фазы суточного гидродинамического режима водохранилища и обоснованно выбрать станции отбора проб для химического анализа при проведении мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Л.: Наука, 1969.
2. Вишневецкий В.И. Об изменениях скорости и направления течения под влиянием сбросов ГЭС. //IV конференция "Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей". Том 1, Москва, 1994.
3. Литвинов А.С. Влияние попусков воды Углической и Рыбинской ГЭС на режим течений в Рыбинском водохранилище// Тезисы док. Первой конференции по изучению водоемов бассейна Волги, Тольятти, 1968.
4. Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К. Гидрологические процессы в верхних и нижних бьефах гидроузлов. Издание Пермского ун-та, 1978.
5. Мацкевич И.К. О волновых колебаниях уровня и скорости течения в нижнем бьефе Камской ГЭС// Гидрология и метеорология, вып. V. Уч. Зап. Пермского ун-та, № 246, Пермь, 1970.
6. Рахуба А.В. Оценка качества вод Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора г. Самара // Водное хозяйство России, 2005. Т. 7, №6.
7. Рахуба А.В. Моделирование динамики примеси в нижнем бьефе водохранилища при экстремальных попусках ГЭС. // Водное хозяйство России, 2010, № 4.
8. Чигиринский П.Ф. Динамика водной поверхности Саратовского водохранилища // Сб. работ Тольяттинской ГМО. Вып. 11. Л., 1979.
9. Чигиринский П.Ф., Коняев А.Н. О расчете вынужденных колебаний уровня воды Куйбышевского водохранилища, вызываемых изменением нагрузок ГЭС// Тр. ГПИ, вып. 113, 1964.
10. Ярославцев Н. А., Шмелева Е.А. Режим течений Горьковского водохранилища // Сб. раб. Горьковской и Волжской ГМО, вып.4, 1967.

LONG-WAVE DYNAMICS AND ITS INFLUENCE ON THE QUALITY OF WATER IN THE RESERVOIR DAILY REGULATION

© 2011 A.V. Rakhuba

Institute of Ecology of Volga River Basin of Russian Academy of Sciences, Togliatti

Specific features of the daily regulated channel-type reservoirs water quality formation have been discussed. Outcomes of the field observation on time (daily) and spatial dynamics of the Saratov reservoir hydrologic and hydro/chemical characteristics have been given. Assessment of water quality variation in the hydro power station discharge influenced zone based on the obtained results has been made.

Key words: hydrologic and hydro/chemical regime, water quality, mathematical simulation.