

УДК 556.5(282.247.416.8)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУТОЧНОГО РЕЖИМА ВОДООБМЕНА В ПОГРАНИЧНОЙ ЗОНЕ СЛИЯНИЯ р. СОК И САРАТОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

© 2012 А. В. Рахуба

Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук, Тольятти.

Поступила в редакцию 29.09.2011

В работе рассматриваются особенности водообмена устьевой области притока и водохранилища в условиях суточного режима работы ГЭС. Представлены результаты натурных и модельных исследований гидрологического и гидрохимического режимов в зоне смешения вод. Проводится модельный анализ пространственной неоднородности прибрежных вод Саратовского водохранилища в районе г. Самара. Ключевые слова: устьевая область, водообмен, зона смешения, гидрологический и гидрохимический режимы, турбулентный обмен, численное моделирование.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Водный режим водохранилищ и устьев боковых притоков имеет существенные отличия от режима естественных водных объектов. Ведущим фактором, определяющим состояние водных экосистем в зоне сопряжения устья реки и водохранилища, является водообмен. Воздействие водообмена сказывается как на физико-химических показателях воды, так и на условиях обитания водных организмов [2].

В условиях суточного и недельного регулирования стока в устьевых областях притоков возникает зона переменного подпора, где происходит смешение речных и водохранилищных водных масс. В зависимости от характера попусков воды на ГЭС смешение водных масс сопровождается комплексом интенсивных гидродинамических и внутриводоемных процессов трансформации вещества и энергии. В течение суток даже при небольших изменениях уровня воды могут наблюдаться многочисленные разнонаправленные колебания скорости течения, которые сопровождаются развитием горизонтальной и вертикальной неоднородности гидрохимических и гидробиологических показателей водной среды.

Многие исследования на водохранилищах показывают [2, 7], что речные и смешанные в устьях притоков водные массы поступают и перемещаются по акватории водохранилища отдельными объемами. Такие объемы сохраняют свои индивидуальные свойства в течение одних-двух суток [1, 7], в результате чего состояние качества водохранилищных вод в окрестностях впадения боковых притоков носит явно изменчивый характер [6].

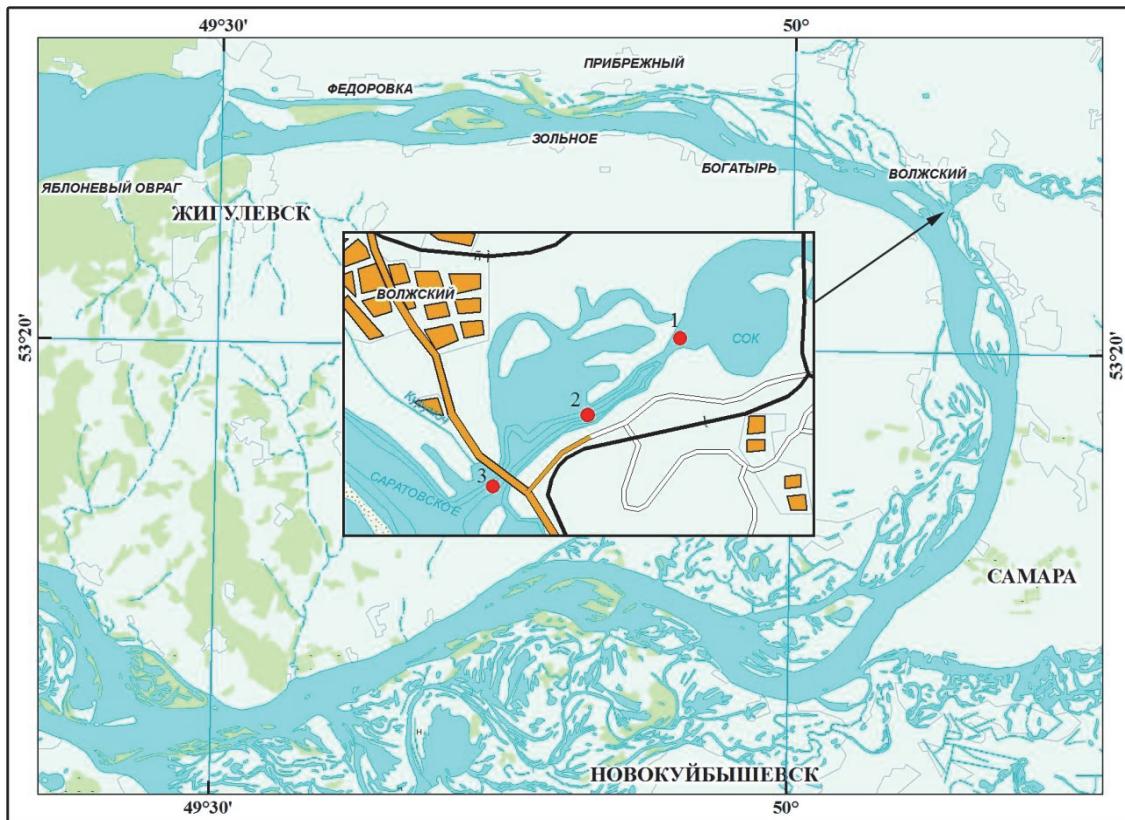
Целью данной работы было изучить особенности динамического взаимодействия вод р. Сок и Саратовского водохранилища в зоне переменного подпора, установить границы смешения и пространственно-временные масштабы распространения речных вод в водохранилище.

### **2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Исследования проводились в районе впадения р. Сок в Саратовское водохранилище, удаленном от плотины Жигулевской ГЭС на 44 км (рис. 1). Устьевая область притока находится в зоне переменного подпора и представляет собой крупные и мелкие заливы с обширной водной растительностью. Глубина реки в заливах и в русловой части изменяется в широких пределах – от 0,2 до 5 м. Средний расход в незарегулированной части реки составляет 15 м<sup>3</sup>/с.

В среднем и нижнем течении р. Сок распространены карстовые воронки, которые обусловлены выщелачиванием гипсов, что является основной причиной ее высокой минерализации и преобладания сульфатов в солевом составе [5]. По классификации Алекина р. Сок принадлежит сульфатному классу кальциевой группе рек со средней минерализацией порядка 1000 мг/л. Воды Саратовского водохранилища относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы со средней минерализацией 300 мг/л. Для сравнения водных масс в таблице 1 показан ионный состав вод р. Сок и Саратовского водохранилища по сезонам года.

Характерная амплитуда суточных колебаний уровня воды в устьевой области р. Сок составляет 0,5-1,0 м, что вызывает изменение не только скорости, но и направления течения реки. При



**Рис. 1.** Модельный участок устьевой области р. Сок  
(1, 2, 3 – вертикали отбора проб воды)

**Таблица 1.** Состав главных ионов и минерализация за период 2006-2011 гг.

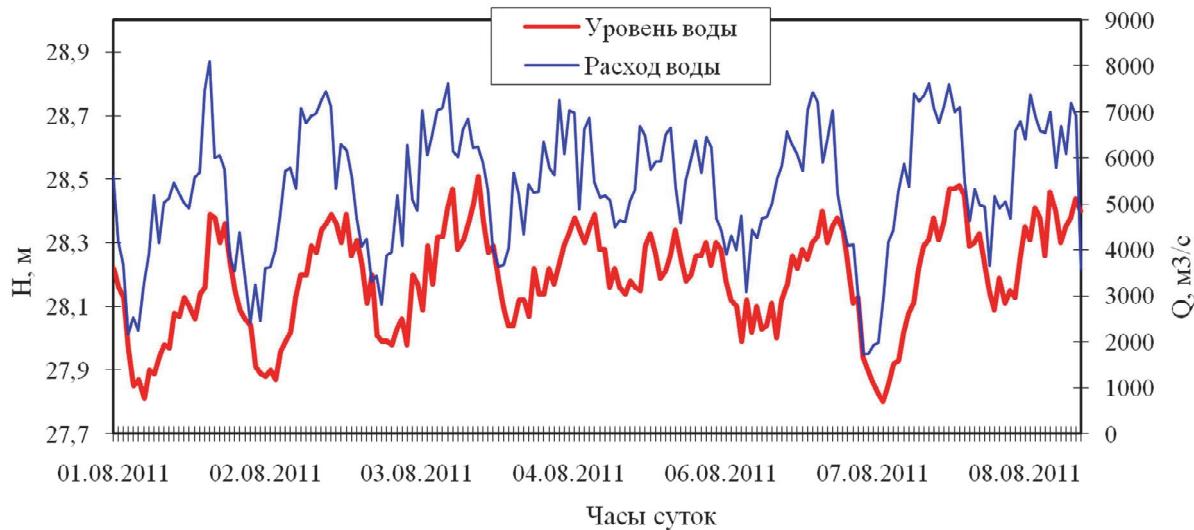
Показатель	р. Сок (мг/л)				Саратовское вод-ще (мг/л)			
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	337,0	148,3	344,0	353,0	147,8	122,6	107,0	121,8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	596,0	111,2	448,0	500,0	62,1	56,2	47,6	55,6
Cl <sup>-</sup>	61,0	6,7	45,0	52,8	24,1	22,4	29,3	24,1
Ca <sup>+</sup>	262,0	69,8	197,0	215,8	60,0	47,2	41,5	47,8
Mg <sup>+</sup>	42,0	9,5	48,0	49,3	13,9	10,2	10,0	11,0
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	76,0	17,0	60,0	75,1	43,2	26,8	44,3	30,4
? ионов	1370	362,5	1142	1246	351,2	285,3	279,7	290,6

прохождении волны попуска на водохранилище часть волжской воды попадает в устье, изменяя гидродинамику и гидрохимию в границах зоны переменного подпора. Затем накопленная вода возвращается в водохранилище, когда ГЭС работает на малых нагрузках.

Для изучения водообменных процессов в период с 4 по 8 августа 2011 года в зоне смешения вод нами были проведены измерения гидрологических и гидрохимических характеристик. Была поставлена задача оценить суточную динамику гидрохимических показателей в зоне смешения, дальность проникновения волжских

вод в зоне подпора и границы распространения вод притока в акватории Саратовского водохранилища при известном режиме колебания уровня воды в нижнем бьефе Саратовского водохранилища (рис. 2).

В ходе натурных наблюдений в устьевой области вдоль линии смешения вод были выбраны три вертикали (рис. 1), на которых в характерные фазы колебания уровня (в 7 и 16 часов) в поверхностном горизонте отбирались пробы воды для химического анализа. Контрольные измерения уровня воды и удельной электропроводности (УЭП) осуществлялись на суточной



**Рис. 2.** Расход и уровень воды в нижнем бьефе Жигулевской ГЭС за 01.08-8.08.2011 г.

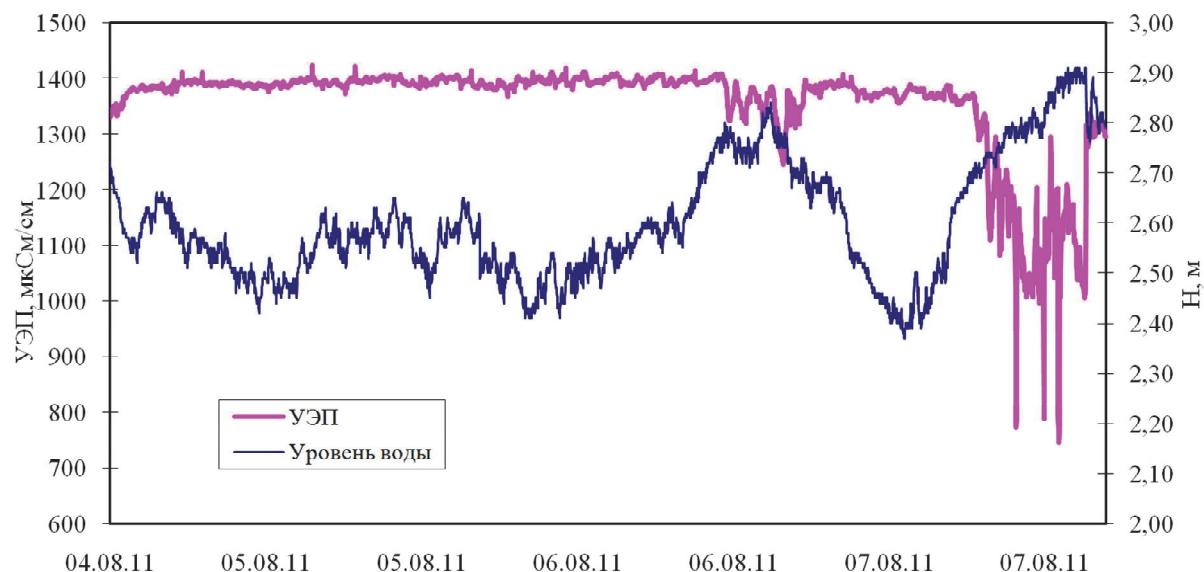
станции (вертикаль 2) с интервалом 1 мин автоматизированной измерительной системой «DS-5X». Затем на материале наблюдений с помощью программного комплекса «ВОЛНА» [3, 4] было выполнено моделирование и расчет динамики водообмена.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдениями за уровнем, скоростью и направлением течения было установлено, что волжские воды начинают поступать в устье в дневные часы суток (10-11 часов). Перенос водохранилищных вод сопровождается периодическими разнонаправленными колебаниями движения потока и завершается к моменту достижения максимального уровня (0-1 час). В этот период происходит активное перемешивание водных масс в верхних слоях и менее интенсивное — в

глубинных горизонтах. Детальные измерения, проведенные на суточной станции, показывают, что незначительные колебания уровня (20-30 см) не оказывают существенного влияния на смешение вод в придонных слоях, тогда как колебания порядка 50-70 см вызывают падение УЭП почти в два раза (рис. 3). После начала спада уровня воды поток разворачивается по направлению к водохранилищу, и устье полностью заполняется речными водами.

Пространственно-временная неоднородность вод устьевой области хорошо прослеживается по многим гидрохимическим показателям (табл. 2). В дневные и вечерние часы суток, когда идет заполнение устья водами из водохранилища, диапазон изменения УЭП в 1,5 раза, pH в 3,1 раза, ХПК (химическое потребление кислорода) в 4,9 раза и БПК<sub>5</sub> (биохимическое потребление кислорода) в 2 раза выше, чем в ночные и



**Рис. 3.** Изменчивость УЭП в придонном слое потока на суточной станции (вертикаль 2)

**Таблица 2.** Гидрохимические показатели в зоне смешения вод  
Саратовского водохранилища и р. Сок за 04.08-08.08.2011 г.

Дата/Время	4 августа 16 ч			5 августа 7 ч			7 августа 16 ч			8 августа 7 ч		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Вертикали												
pH	7,94	7,99	7,99	8,09	8,05	8,07	8,07	8,14	7,80	8,13	8,07	8,02
Eh, мВ	344	321	332	235	222	210	352	333	347	283	282	255
УЭП, мкСм/см	1368	1451	555	1373	1379	1336	1375	865	390	1191	1067	723
ПО, мг/л	3,36	4,16	6,24	3,36	3,04	3,52	2,72	6,72	6,40	4,80	5,28	7,36
ХПК, мг/л	37,5	30,4	23,2	20,8	24,3	20,8	20,5	23,9	27,3	24,2	21,5	22,1
Цветность, град	38	29	35	31	36	34	29	32	40	30	32	38
БПК <sub>5</sub> , мг/л	1,20	0,90	0,77	1,48	0,83	0,68	2,04	0,44	1,02	1,22	0,76	0,70
Фосфаты, мг/л	0,140	0,158	0,063	0,140	0,147	0,149	0,123	0,090	0,049	0,108	0,100	0,077
Фосфор общий, мг/л	0,192	0,206	0,096	0,160	0,180	0,182	0,162	0,126	0,068	0,150	0,138	0,104
Нитраты, мг/л	0,39	0,42	0,39	0,35	0,33	0,41	0,37	0,34	0,26	0,35	0,37	0,35
Нитриты, мг/л	0,017	0,015	0,027	0,013	0,012	0,015	0,010	0,024	0,035	0,017	0,020	0,024
Аммоний, мг/л	0,041	0,097	0,156	0,130	0,043	0,053	0,054	0,084	0,126	0,049	0,057	0,053

**Таблица 3.** Средние значения некоторых гидрохимических показателей  
за период наблюдений за 04.08-08.08.2011 г.

Показатель	Среднее течение реки		вертикаль 1		вертикаль 2		вертикаль 3	
	р. Сок	р. Волга	7 ч	16 ч	7 ч	16 ч	7 ч	16 ч
pH	8,2	7,77	8,11	8,01	8,06	8,07	8,05	7,9
Eh, мВ	-	230	259	348	252	327	233	340
УЭП, мкСм/см	1342	382	1282	1372	1223	1158	1030	473
ПО, мг/л	4,07	7,12	4,08	3,04	4,16	5,44	5,44	6,32
ХПК, мг/л	31,1	27,1	22,5	29,0	22,9	27,2	21,5	25,3
БПК <sub>5</sub> , мг/л	1,62	0,97	1,35	1,62	0,80	0,67	0,69	0,90

вечерние часы. Пространственное распределение указанных гидрохимических показателей характеризуется устойчивым возрастанием от водохранилища вдоль линии смешения вглубь устья во все фазы колебания уровня воды. Достоверно судить о пространственной неоднородности вод можно по показателю УЭП. Так, по данным проведенных измерений в границах зоны смешения со стороны водохранилища (вертикаль 3) УЭП составляет 390-555 мкСм/см и со стороны реки (вертикаль 1) – 1368-1375 мкСм/см. В центральной части зоны смешения (вертикаль 2) прослеживается максимальная неоднородность по УЭП – 865-1451 мкСм/см.

В период пика смешения водных масс (15-16 часов) на всех трех вертикалях концентрация органического вещества (по ХПК, ПО, БПК<sub>5</sub>) наблюдается выше, по сравнению с периодом

спада подпора (табл. 3). Исключение представляет вертикаль 1, которая расположена на границе зоны смешения вод, и где не прослеживается определенной зависимости ПО и БПК<sub>5</sub> с гидрологическими fazами. По-видимому, увеличение органики в водной толще устья можно объяснить взмучиванием илистых отложений при развитии вертикального турбулентного обмена в процессе торможения естественного течения реки в ходе подпорных явлений со стороны водохранилища.

На следующем этапе изучения водообмена в устьевой области р. Сок было проведено численное моделирование геометрии зоны смешения, а так же рассчитан режим поступления в водохранилище вод, формирующихся в зоне переменного подпора, и оценено влияние р. Сок на прибрежные воды водозабора г. Самара.

Для моделирования использовались уравнения движения жидкости в длинноволновом приближении (уравнения “мелкой воды”) и полуимперицкое уравнение переноса примеси. Разработанная модель построена на основе прямоугольной сетки с шагом 50 м и представляет собой двухмерный плановый участок Саратовского водохранилища и устьевой части р. Сок. При выбранном пространственном шаге и имеющемся распределении глубин устойчивость расчета обеспечивалась временным шагом, равным 1 сек.

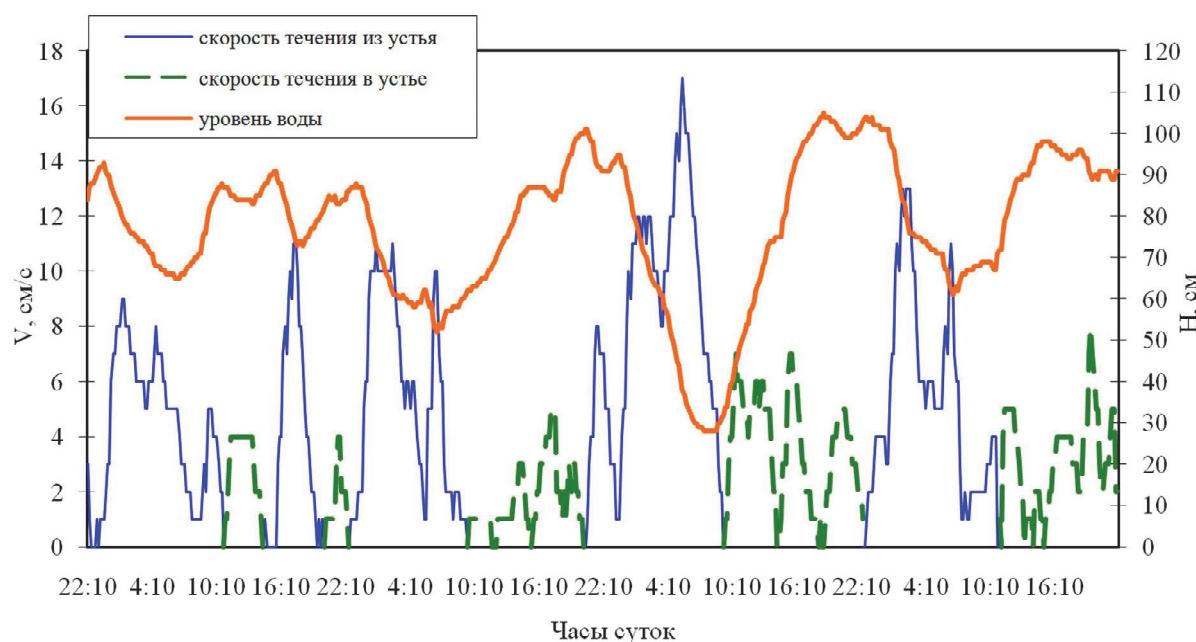
Проведенные расчеты динамики течений в зоне смешения вод показали, что при существующем изменении уровня водной поверхности на Саратовском водохранилище в течение суток наблюдаются неоднократные колебательные движения водной массы в прямом и обратном направлениях (рис. 4). Причем скорость течения из устья в водохранилище выше скорости поступления волжских вод в устье более чем в два раза. Так, рассчитанные на модели осредненные по глубине скорости течений на вертикали 2 в прямом направлении (из устья) составляют 0,08-0,17 м/с, в обратном (в устье) – 0,04-0,08 м/с. За сутки количество таких колебательных движений может доходить до шести и выше в зависимости от режима попусков на ГЭС.

Дальность проникновения вод водохранилища в устьевую область была рассчитана по показателю УЭП, с помощью которого наилучшим образом выделяются пространственная граница разнородных водных масс. Эта граница характеризуется наибольшим градиентом, и для устьевой области р. Сок составляет 1,5-6 мкСм/см на 1 метр акватории. Максимальное распростране-

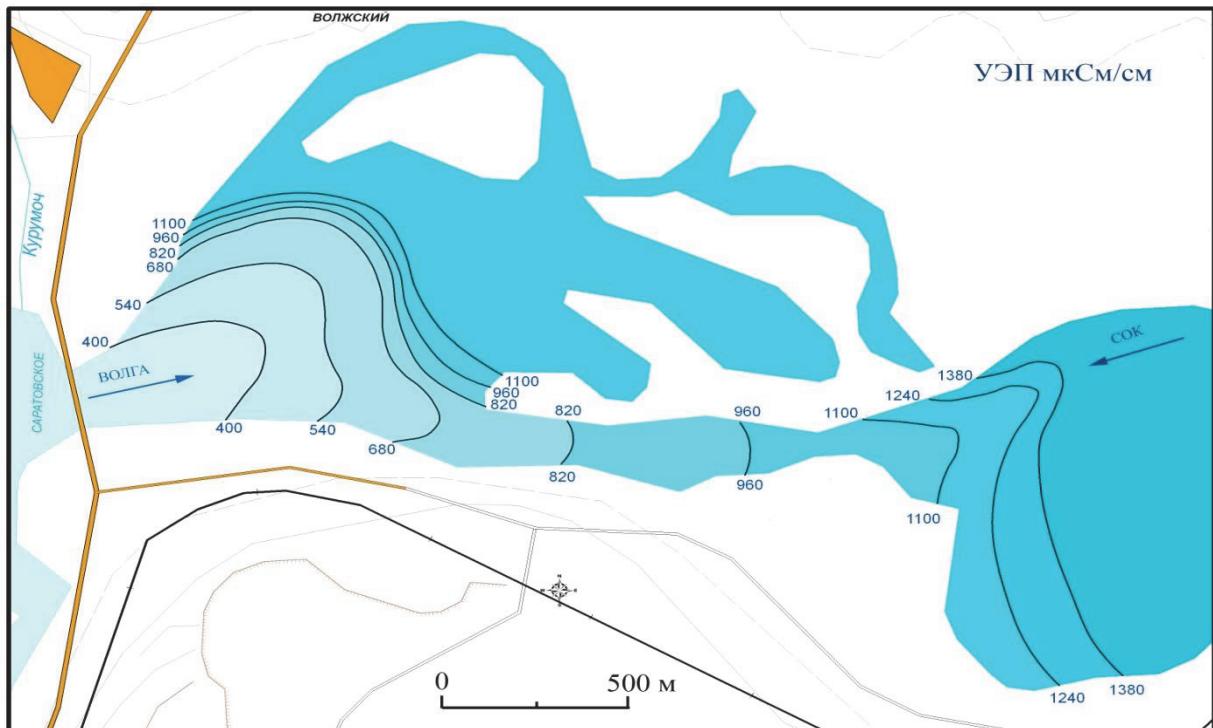
ние водохранилищных вод в устье притока (при среднем колебании уровня воды 50-70 см) приходится на вечерние часы суток и достигает 2,5 км (рис. 5).

Перемещение водной массы устьевой области в акваторию Саратовского водохранилища следует сразу после спада уровня воды и распространяется по течению Волги вдоль левого берега полосой с шириной в 400-500 м. Затем после островов Красноглинский и Серный поток речных вод разделяется на два рукава. Основной проходит по русловой части водохранилища, огибая острова с правой стороны, другой – вдоль узкой протоки слева. Диффузия и скорость распространения этих потоков неодинакова, в результате чего формируется пространственная неоднородность гидрохимических показателей прибрежной зоны Саратовского водохранилища (рис. 6). Расчеты показывают, что в период прохождения водных масс р. Сок в русловой части водохранилища в течение суток УЭП воды меняется от 370 мкСм/см (фон) до 405-410 мкСм/см. Между островами, в сужениях и затонах УЭП достигает 415-420 мкСм/см. В левобережной протоке прослеживаются лишь небольшие зоны, где УЭП составляет 375-395 мкСм/см.

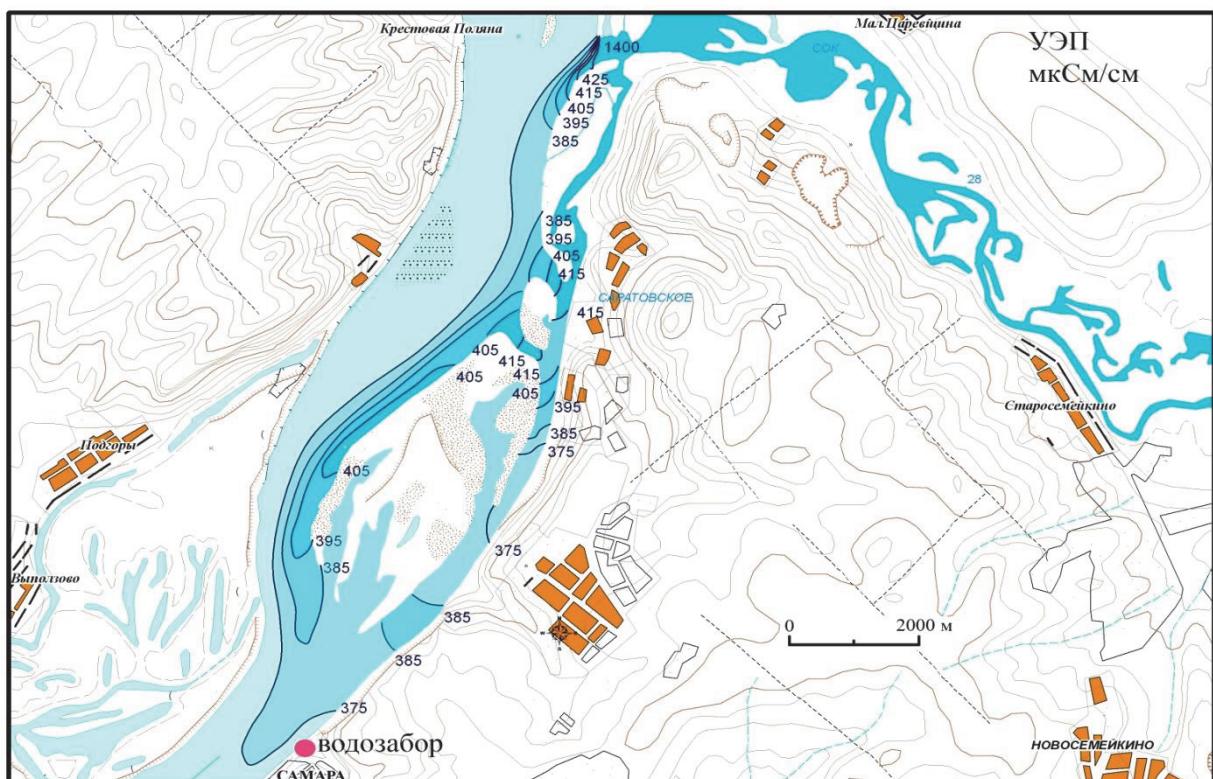
На расстоянии 12-13 км от устья р. Сок, в районе прибрежной акватории г. Самара разделившиеся потоки сходятся и ниже города полностью перемешиваются с волжскими водами. Модельная оценка влияния водных масс на городской водозабор показывает, что УЭП воды в этом районе превышает фоновые значения на 11% с прохождением максимума (398-408 мкСм/см) в вечерние часы суток.



**Рис. 4.** Модельный расчет гидродинамического режима в устье р. Сок на вертикали 2 за период 04.08-08.08.2011 г.



**Рис. 5.** Модельные расчеты пространственного распределения УЭП в устьевой области р. Сок в вечерние часы суток



**Рис. 6.** Модельный расчет распространения вод р. Сок в Саратовском водохранилище

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выше изложенного можно заключить, что в течение суток формирование зоны смешения вод сопровождается как горизонталь-

ной, так и вертикальной неоднородностью водной толщи. Этому способствует пульсационный неуставновившийся режим смены течений, при котором скорость потока из устья в водохранилище заметно выше скорости поступления волжских вод на-

зад в устье. В зоне контакта речных и водохранилищных водных масс интенсивное смешение происходит в поверхностной толще воды, где скапливаются слабо минерализованные воды. В придонном слое минерализация остается стабильно выше, чем в верхних слоях, и лишь при значительных колебаниях уровня наблюдается перемешивание по всей глубине. Следует отметить, что в устье притока действие подпорных эффектов сопровождается развитием вертикального турбулентного обмена, при котором содержание органического вещества в воде возрастает. При снижении подпора содержание органики также снижается.

Таким образом, поступление волжских вод в устье р. Сок, смешение и последующая разгрузка в Саратовское водохранилище создают нестабильный режим водной среды, не характерный для неприливных устьев рек. В течение суток значения гидрохимических показателей в этом районе изменяется в 1,5-5 раз, а зона неоднородности вод распространяется на 2,5 км вглубь устья и на 15 км ниже границы впадения притока в водохранилище, при этом в область влияния водных масс р. Сок попадает водозабор г. Самара.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Буторин Н.В., Эдельштейн К.К.* Водные массы водохранилищ волжского бассейна // Труды 17 Всесоюзного гидрологического съезда. Т. 5. Л.: Гидрометиздат, 1975. С. 126-133.
2. *Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К.* Гидрологические процессы в водохранилищах. Учебное пособие по спецкурсу «Гидрология водохранилищ» [под общей редакцией Ю.М. Матарзина]. Пермь: Пермский ун-т, 1977. 88 с.
3. *Рахуба А.В.* Оценка качества вод Саратовского водохранилища в районе питьевого водозабора г. Самара // Водное хозяйство России. 2005. Том 7. №6. С. 601-611.
4. *Рахуба А.В.* Моделирование динамики примеси в нижнем бьефе водохранилища при экстремальных попусках ГЭС // Водное хозяйство России. 2010. №4. С. 28-40.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Выпуск 1. Нижнее Поволжье. Гидрометеоиздат. Л., 1976. 411 с.
6. *Рохмистров В.Л.* Гидрологическая характеристика р. Солоницы в зоне подпора // Биология внутр. вод: Информ. Бюлл. № 23. 1974. С. 57-59.
7. *Эдельштейн К.К.* Водные массы долинных водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1991. 176 с.

## **THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DAILY MODE OF WATER EXCHANGE IN THE BORDER ZONE WHERE THE RIVER SOK AND THE SARATOV RESERVIOR MERGE**

© 2012 A.V. Rakhuba

The Institute of Ecology of the Volga River Basin -Russian Academy of Sciences, Togliatti.

Research shows the features of the water exchange between the estuarine area of inflow and the water basin. Results were taken from conditions of the daily mode of operations of the Hydroelectric Power Station. Results of natural and model researches of hydrological and hydro-chemical modes, in a water-mixing zone, are presented. I will illustrate a model analysis of the spatial heterogeneity of water in the coastal waters of the Saratov Reservoir near the town of Samara.

Keywords: estuarine area, water exchange, mixing zone, hydrological and hydro-chemical modes, a turbulent exchange, numerical modeling.