

# МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ и ОБЪЕМОВ МЕЛКОВОДНОЙ ЗОНЫ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ

**Площади и объемы мелководий водохранилищ в зависимости от многолетних изменений уровня воды рассчитаны по функциям  $S=f(Z)$  и  $V=f(Z)$ . Рассматриваются особенности осушения и наполнения водохранилищ и воздействие этих процессов на донные биоценозы. Обсуждаются критерии выделения границы мелководной зоны водохранилищ.**

## Введение

**М**ноголетние и сезонные колебания уровня воды в водохранилищах приводят к периодическому изменению их водной поверхности. В связи с этим в период сработки часть побережья осушается и переходит в территорию побережья, а в период наполнения затопливается водой водохранилища. Периодическое осушение и затопление ложа водохранилища способствует формированию на этой площади специфических условий обитания живых организмов, которые характерны, с одной стороны, для береговых, а с другой стороны — для аквальных экосистем. Такую территорию предложено именовать аква-территорией водохранилища (АТВ) [1]. В пределах большей части АТВ расположена мелководная зона водоемов.

В водохранилищах Верхней Волги, характеризующихся трехфазным типом водного режима (фаза наполнения сменяется фазой медленной сработки или равновесия в навигационный период с дальнейшей интенсивной сработкой зимой), осушение АТВ в целом оказывает негативное влияние на биоценозы мелководий. Более раннее начало осушения приводит к гибели многих видов донных животных, которые не успевают полностью завершить свое развитие и

**С.А. Поддубный\***,  
доктор географических наук, директор, ФГБУН  
Институт биологии внутренних вод им.  
И.Д. Папанина  
Российской академии наук

оставить покоящиеся стадии. Более позднее осушение способствует выживанию организмов, образующих покоящиеся стадии, но снижение уровня воды после наступления ледостава приводит к примерзанию верхнего слоя донного субстрата к нижней поверхности льда и при затоплении АТВ лед всплывает, разрушая структуру седиментов. Степень воздействия осушения на беспозвоночные в значительной мере зависит от временных параметров этого процесса. Многолетнее осушение, которое наступает в маловодные годы (например, трехлетнее осушение мелководий Рыбинского вдхр. в 1971-1973 гг.), можно рассматривать как катастрофу для осушаемых мелководий, когда биота этих местообитаний практически полностью гибнет [2].

Цель настоящей работы заключается в анализе многолетних изменений площадей и объемов АТВ в периоды осушения и наполнения водохранилищ, выделении границ мелководной зоны и выявлении изменений морфометрических показателей мелководий.

## Материалы и методы исследования

**В** работе использованы литературные данные по многолетним изменениям уровня режима верхневолжских водохранилищ, дополненные материалами регулярных наблюдений Рыбинской гидрометеобсерватории [3, 4]. Данные по уровням воды Ивановского вдхр. любезно предоставлены ОАО «Проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука». Анализировались минимальные уровни предполоводной сработки и максимальные уровни весеннего наполнения. Исследуемый период для водохранилищ составил с 1947–1956 по 2010 гг. Все уровни воды в водохранилищах даны в Балтийской системе (БС).

\*Адрес для корреспонденции: [spod@ibiw.yaroslavl.ru](mailto:spod@ibiw.yaroslavl.ru)

Таблица 1

Уравнения аппроксимации  $S=f(Z)$  и  $V=f(Z)$ 

Уровень воды (Z), м БС	Уравнение	Ошибка аппроксимации, %
<b>Иваньковское вдхр.</b>		
123,0–124,4	$S=456750-7489,4047Z+30,7143Z^2$ $V=771210-12764,7143Z+52,85735Z^2$	0,06 0,0
120,0–123,0	$S=94337,15-1595,35Z+Z^2$ $V=335560-5673,4Z+Z^2$	0,35 0,78
118,0–120,0	$S=40175-694Z+Z^2$ $V=133072-2306Z+10Z^2$	0,0 0,0
<b>Угличское вдхр.</b>		
110,0–114,0	$S=43673,5899-818,7363Z+3,8446Z^2$ $V=254820-4738,1Z+22,0714Z^2$	2,78 1,4
107,0–110,0	$S=43673,5899-818,7363Z+3,8446Z^2$ $V=96055-1857Z+9Z^2$	2,78 1,4
<b>Рыбинское вдхр.</b>		
95,81–101,81	$S=121790-2825,2883Z+16,4405Z^2$ $V=1748,7953-38,2956Z+0,20988Z^2$	1,05 1,1
91,81–95,81	$S=98445,7941-2424,6996Z+14,8036Z^2$ $V=1365,9597-30,3247Z+0,168576Z^2$	2,15 1,1
<b>Горьковское вдхр.</b>		
80,0–85,5	$S=45922,8386-1267,6128Z+8,8071Z^2$ $V=549,5842-14,46Z+0,0955Z^2$	0,3 0,53

Площадь осушаемой АТВ ( $S_o$ ) вычислялась по формуле:  $S_o = S_{\max i} - S_{\min i+1}$ , где  $S_{\min}$  – площадь поверхности при минимальном уровне предполоводной сработки,  $S_{\max}$  – площадь поверхности при максимальном уровне весеннего наполнения,  $i$  – текущий год. Площадь затопления АТВ ( $S_z$ ) определялась по формуле:  $S_z = S_{\max i} - S_{\min i}$ . Соответственно, объем осушаемой ( $V_o$ ) и затопляемой ( $V_z$ ) АТВ вычислялся по формулам:  $V_o = V_{\max i} - V_{\min i+1}$  и  $V_z = V_{\max i} - V_{\min i}$  ( $V_{\max}$  и  $V_{\min}$  – максимальный и минимальный объем водохранилища, соответствующий  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$ ). Расчет площадей и объемов АТВ проводился по зависимостям  $F=f(Z)$  и  $V=f(Z)$ , которые аппроксимировались полиномиальными уравнениями (табл. 1).

## Результаты и их обсуждение

### Многолетние изменения площадей и объемов АТВ

Анализ колебаний уровня воды в водохранилищах за многолетний период показал, что как сроки наполнения и сработки водохранилища, так и величина максимальных и минимальных уровней сильно варьируют в разные годы и определяют ту или иную величину ежегодно осушаемых и затопляемых мелководных территорий. Кроме колебаний уровня на величину затопляемых и осушаемых участков АТВ влияет их морфометрия.

Анализ рядов площадей наполнения и осушения водохранилищ показывает, что в среднемноголетнем плане в Иваньковском вдхр. АТВ занимает 76 % от площади водоема при нормальном подпорном уровне (НПУ), в Угличском 46–47 %, в Рыбинском 31 % и в Горьковском 19–20 %. Причем в Иваньковском и Угличском вдхр. в силу их мелководности вклад в величину площади АТВ вносит как морфометрия водоема, так и величина понижения (повышения) уровня (табл. 2).

В Иваньковском вдхр. превышение площади АТВ над площадью поверхности при НПУ наблюдалось в первые годы существования водоема, когда сработка уровня достигала 6,4–7,4 м, а максимальный уровень наполнения достигал отметок 124,38–124,45 м. В этом же водоеме при понижении уровня воды на 2 м осушается практически половина площади водоема. В Угличском вдхр. 50 % площади осушается при сработке уровня на 3,5 м, а в Рыбинском и Горьковском вдхр. – при сработке до 5 м (табл. 3).

Объемы АТВ водохранилищ изменяются в соответствии с изменением площадей затопляемой (осушаемой) территории. В Иваньковском и Угличском вдхр. процентные отношения площадей и объемов АТВ при различных уровнях воды к НПУ близки между собой. С увеличением глубины водоема и уменьшением площади АТВ ее объемы возрастают (Рыбинское и Горьковское вдхр.). Для Рыбинского и Горьковского вдхр.



Таблица 2

Морфометрические характеристики АТВ верхневолжских водохранилищ

Характеристика	Водохранилище			
	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское
Площадь при НПУ, км <sup>2</sup>	327	249	4550	1591
<b>наполнение</b>				
площадь, км <sup>2</sup>	144–338	20–166	657–2386	163–580
в % от НПУ	44–103*	8–67	14–52	10–36
Средняя площадь, км <sup>2</sup>	248	115	1427	311
в % от НПУ	76	46	31	20
объем 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	445–1095	100–806	5000–18700	1900–4700
в % от НПУ	40–98	8–65	20–74	21–53
средний объем 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	796	554	11300	2900
в % от НПУ	71	44	44	33
<b>осушение</b>				
площадь, км <sup>2</sup>	150–346	13–175	0–2491	144–580
в % от НПУ	46–106*	5–70	0–55	9–36
Средняя площадь, км <sup>2</sup>	247	116	1413	307
в % от НПУ	76	47	31	19
объем 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	447–1122	62–867	0–19400	1700–4700
в % от НПУ	40–100	5–70	0–76	19–53
средний объем 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>	792	558	11200	2900
в % от НПУ	71	45	44	33
понижение уровня, м	1,5–7,4	0,3–5,3	0–5,6	0,7–3,2
среднее понижение уровня, м	3,8	3,1	2,9	1,5

Примечание: \* – в случае превышения площади поверхности в конкретном году по сравнению с площадью поверхности при НПУ.

величина объемов АТВ, на наш взгляд, зависит в большей степени от понижения (наполнения) уровня воды, чем от морфометрии водоема (табл. 2, 3).

Согласно ранее проведенным исследованиям [5] вероятность катастрофических последствий воздействия осушения на гидробионтов наиболее велика на участках мелководья между изобатами 3 и 5 м. Повторяемость осушения в этом диапазоне глубин составляет 64,8 % для Иваньковского вдхр., 50 и 66,7 %, соответственно, для Угличского и Рыбинского вдхр., а периодичность снижения уровня ниже 3 м – 2-3 года. За это время на данных участках успевает образоваться биоценоз, на котором кроме специфической фауны осушенных местообитаний развивается фауна, не приспособленная к воздействию периодического осушения. Эти гидробионты не выдерживают осушения и практически полностью погибают, приводя к значительным колебаниям обилия беспозвоночных. В Горьковском вдхр. в 79,2 % случаев осушение мелководий происходит до глубины 1-2 м. Здесь в первую очередь негативным фактором воздействия на донные биоценозы будет выступать ветровое волне-

**Ключевые слова:** уровень воды, площадь, объем, граница мелководий, экосистема

ние. Суммарное влияние волнового воздействия и периодического осушения объясняет существование тесной положительной корреляционной зависимости ( $r = +0,93$ ) между глубиной и общим числом обнаруженных видов бентоса [6], минимальное число которых отмечено на глубинах до 2 м (глубинах разрушения ветровых волн и формирования вдольбереговых течений), а максимальное – на глубине 5,5 м.

*Критерии выделения внутренней границы мелководной зоны*

В настоящее время существует ряд критериев выделения внутренней границы мелководной зоны водоемов (**Н**), применимых и к водохранилищам, которые можно ранжировать следующим образом.

Гидрологические критерии:  $H \leq 0,5\lambda$ ,  $H \leq 0,6\lambda$ ,  $H \leq 0,65\lambda$  или  $1,5h - 2h$  ( $\lambda$ ,  $h$  - длина и высота волны) – начало взаимодействия волн с дном; глубина на внешней границе прибрежной зоны, где начинается движение донных наносов (песка) под воздействием волнения;  $H=2$  м – величина навигационной сработки уровня для многих равнинных водохранилищ. Проектно-технический критерий:  $H=2,5$  м от уреза воды. Гидробиологический критерий:

Таблица 3

Площадь и объем мелководий верхневолжских водохранилищ (в % от площади поверхности и объема при НПУ)

Глубина, м	Водохранилище							
	Иваньковское		Угличское		Рыбинское		Горьковское	
	площадь	объем	площадь	объем	площадь	объем	площадь	объем
1	30	25	20	18	11	17	13	17
2	48	45	36	33	21	32	25	32
3	61	58	45	44	31	45	35	44
4	71	69	55	54	41	57	45	55
5	78	76	61	62	48	67	50	60

по границе захождения высшей водной растительности —  $H=2,5-3$  м от НПУ [2, 7].

Комплексный критерий с учетом ряда гидрологических и гидробиологических показателей: глубины начала эрозии донных наносов волновыми потоками, глубины распространения песков, глубины распространения нижней границы высшей водной растительности, глубины начала влияния максимальных орбитальных скоростей у дна в волновом потоке на биомассу бентоса. В данном случае глубина на внутренней границе мелководной зоны относительно НПУ определяется как среднее значение перечисленных выше показателей; для Рыбинского вдхр. оно составляет  $H=4$ , а для Иваньковского и Угличского —  $H=3$  м [2].

Все рассмотренные критерии основаны на статическом принципе зонирования прибрежья и могут быть применимы лишь для малочисленных однофазных водохранилищ, не осуществляющих сезонного регулирования стока, или в летне-осенний период на водохранилищах с фазой равновесия при НПУ (в случае трехфазного типа водного режима). При этом предпочтительно использование комплексного критерия, учитывающего ряд гидрологических и гидробиологических факторов. Следует отметить, что значение комплексного критерия для Иваньковского и Угличского вдхр. ( $H=3$  м) близко к среднему многолетнему понижению уровня при осушении этих водоемов — 3,8 и 3,1 м, соответственно (табл. 2).

Таблица 4

Средние значения морфометрических характеристик осушаемых мелководий АТВ Рыбинского вдхр. в безледный период

Характеристика	Месяц					
	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
$Z_{max}$ , м	101,21	101,40	101,18	100,81	100,44	100,12
$S_{max}$ , км <sup>2</sup>	4252	4344	4235	4054	3873	3724
$S_z$ , км <sup>2</sup>	2839	2931	2822	2641	2460	2311
$Z$ , м	98,30	98,51	98,27	97,83	97,31	96,88
$H_0$ , м	3,5	3,3	3,5	4,0	4,5	4,9

Непригодность статического принципа зонирования очевидна для водохранилищ глубокого сезонного и многолетнего регулирования стока (Рыбинское вдхр.), поскольку в разные по водности годы и в разные сезоны года одни биотопы, прежде мелководные, будут при сработке обсыхать, а другие превращаться из глубоководных в мелководные [1]. Следовательно, применительно к Рыбинскому вдхр. внутреннюю границу мелководной зоны необходимо считать подвижной, а значение  $H$ , соответствующее среднему многолетнему осушению АТВ, отсчитывать от среднемесячного многолетнего максимального уровня наполнения водоема. В этом случае с мая по октябрь глубина внутренней границы мелководья будет изменяться от 3,3 до 4,9 м (табл. 4).

Примечание:  $Z_{max}$  — средний многолетний максимальный уровень наполнения,  $S_{max}$  — площадь поверхности, соответствующая  $Z_{max}$ ,  $S_z$  — площадь поверхности как разность площади поверхности при НПУ и средней многолетней площади осушения (1413 км<sup>2</sup>),  $Z$  — уровень воды, соответствующий  $S_z$ ,  $H_0$  — понижение уровня.

Для Горьковского вдхр. допустимо применение статического принципа выделения нижней границы мелководий. Для озеровидной части водоема из-за ее глубоководности целесообразно использование комплексного критерия, определенного ранее для Рыбинского вдхр., т.е.  $H=4$  м.



## Заключение

Осушение АТВ водохранилищ является существенной составляющей их гидрологического режима и оказывает ощутимое влияние на экосистему мелководий. На водохранилищах, осуществляющих сезонное, ограниченное сезонное, недельное и суточное регулирование стока (Горьковское, Угличское и Иваньковское) уровень воды поддерживается на отметке НПУ или близкого к нему с момента окончания наполнения (май) до начала предполоводной сработки (март). Резкое снижение уровня воды в конце ледостава может приводить к изоляции понижений дна в пределах мелководий (затопленные озера, старицы и т.д.) от русловой части водохранилища, формированию бескислородных зон и, следовательно, гибели зимующих рыб. Кроме того, в результате механического воздействия на дно оседающего льда разрушаются местообитания донных беспозвоночных.

В Рыбинском вдхр. летне-осенняя сработка уровня приводит к постепенному осушению АТВ. На подверженных волновому воздействию незащищенных мелководьях происходит постепенное смещение вглубь водоема гидродинамического воздействия на донные биоценозы. Ненарушенные местообитания гидробионтов наблюдаются на глубинах более 5 м. При интенсивной навигационной сработке уровня в остаточных водоемах защищенных мелководий, изолированных от глубоководной зоны водохранилища, могут оставаться обреченные на гибель скопления рыб. К началу ледостава площадь осушенных мелководий в среднем многолетнем плане может достигать 826 км<sup>2</sup>. Дальнейшее оседание льда весной (март) и

его разрушающее воздействие на дно в период предполоводной сработки уровня происходит в среднем на площади 633 км<sup>2</sup>.

## Литература

1. Эдельштейн К.К. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
2. Герасимов Ю.В. Роль гидрологического режима в формировании скоплений рыб на мелководьях равнинных водохранилищ / Ю.В. Герасимов, С.А. Поддубный. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1999. 172 с.
3. Литвинов А.С. Многолетние и сезонные колебания уровня Рыбинского водохранилища и их роль в функционировании его экосистемы / А.С. Литвинов, В.Ф. Роцупко. Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 1. С. 33–40.
4. Авакян А.Б. Опыт экологизации уровня водохранилищ (на примере Иваньковского) / А.Б. Авакян, А.Е. Асарин // Пространственная структура и динамика распределения рыб во внутренних водоемах. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 1998. С. 71–83.
5. Бакастов С.С. Температурный режим осушенной зоны Рыбинского водохранилища // Гидробиологический режим прибрежных мелководий верхневолжских водохранилищ/ Под ред. Н.В. Буторина. Ярославль, 1976. С. 42-56.
6. Щербина Г.Х. Годовая динамика макрозообентоса открытого мелководья Волжского плеса Рыбинского водохранилища // Зооценозы водоемов бассейна Верхней Волги в условиях антропогенного воздействия / Под ред. И.К. Ривьер. Спб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 108-144.
7. Нежиховский Р.А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 229 с.

S.A. Poddubnyi

## LONG-TERM AREA AND VOLUME CHANGES OF SHALLOW ZONE OF RESERVOIRS OF THE UPPER VOLGA DEPENDING ON WATER LEVEL FLUCTUATIONS

Areas and volumes of reservoir shallow depending on long-term water level fluctuations were calculated using  $S=f(Z)$  and  $V=f(Z)$  functions. Upwatering and filling of reservoirs and influences of the processes on bottom biocenosis are considered. Criteria of boundary detection for reservoir shallow are discussed.

**Key words:** water level, area, volume, shallow boundary, ecosystem