

УДК 574.583:551.526.84

НАРУШЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ПРИТОКА РАВНИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ЛЕТОМ ЖАРКОГО ГОДА

С. Э. Болотов, А. В. Романенко, А. И. Цветков, А. В. Крылов

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
Россия, 1525742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок
E-mail: alhimikhmu@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.01.13 г.

Нарушение вертикального распределения планктона в устьевой области притока равнинного водохранилища летом жаркого года. – Болотов С. Э., Романенко А. В., Цветков А. И., Крылов А. В. – По электропроводности воды во фронтальной зоне устьевой области притока равнинного водохранилища определен участок стратификации. Показано, что на нижнем более плотном слое речных вод наблюдается эффект «второго дна», где развивается зоопланктон, структурно-функциональные показатели которого отличаются от таковых в выше- и нижележащих слоях воды. Развитие бактериопланктона контролируется зоопланктоном. Нарушение эффекта «второго дна» происходит в условиях дефицита содержания кислорода в воде, вызванного аномально высокими температурами в воды.

Ключевые слова: водохранилище, река, устьевая область, бактериопланктон, зоопланктон, вертикальное распределение.

Violation of the vertical plankton distribution in the outfall area of a lowland water reservoir's inflow in the summer period of a hot year. – Bolotov S. E., Romanenko A. V., Tsvetkov A. I., and Krylov A. V. – A stratification site was revealed by the water conductivity in the frontal zone of the outfall area of a lowland water reservoir's inflow. The «second bottom» effect is shown to occur on the lower, denser layer of the river waters, where the zooplankton develops, whose structural and functional indicators differ from those in the overlying and underlying water layers. The bacterial plankton development is controlled by the zooplankton. The «second bottom» effect is violated under oxygen deficiency caused by abnormally high water temperatures.

Key words: river, water reservoir, outfall area, bacterial plankton, zooplankton, vertical distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Устьевые области малых и средних притоков равнинных водохранилищ – протяженные (от 2 до > 50 км (Рыбинское водохранилище, 1972)) участки, которые по продольному профилю характеризуются неоднородностью водных масс (Рохмистров, 1973; Крылов и др., 2010). По аналогии с районированием устьев притоков морей и крупных озер (Михайлов, 1997) в них выделено 3 зоны: переходная притока, фронтальная и переходная приёмника (Болотов и др., 2012). Исследования, проведенные в устье притока Горьковского водохранилища, выявили и вертикальную неоднородность вод (Рохмистров, 1973). Аналогичная картина распределения отмечена в меженный период и в устье притока Рыбинского водохранилища, где также обнаружено, что наибольшее количество зоопланктона концентрируется на верхней границе трансформированных речных вод (Крылов и др., 2009).

НАРУШЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА

Метеорологические условия летних сезонов последних лет аномальны. В России 2011 г. вошел в пять самых теплых лет за период инструментальных наблюдений (Доклад..., 2011). В нем выделяются экстремально теплые весна (+2.56°C) и лето (+1.40°C). Весна оказалась второй после 1990 г. (+3.12°C), а лето – третьим. В среднем по территории России сезонная аномалия температуры составила +1.40°C (ранг 3, после 2010 и 1998 гг.). Очевидно, что высокие температуры воздуха способствуют более сильному прогреванию водных масс, что влечет изменение абиотических параметров воды, которые могут определять развитие и распределение гидробионтов.

Цель работы – изучение вертикального распределения бактерио- и зоопланктона участка стратификации во фронтальной зоне устьевой области притока Рыбинского водохранилища в конце августа жаркого лета.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В летние сезоны 2006 – 2011 гг. в устьевой области р. Ильдь – притоке Волжского плёса Рыбинского водохранилища – портативным зондом «YSI-85» измеряли электропроводность, температуру воды и содержание растворенного кислорода, были рассчитаны величины условной плотности пресной воды (Эдельштейн, 1991).

Во фронтальной зоне устья реки по электропроводности выделено два слоя вод: трансформированных более минерализованных речных и более опресненных водохранилищных (табл. 1).

Таблица 1

Абиотические показатели разных зон устьевой области притока
(средние величины в августе 2006 – 2012 гг.)

Глубина, м	Зоны устьевой области											
	Переходная притока				Фронтальная				Переходная приемника			
	EC_{18}	T	O_2	ρ	EC_{18}	T	O_2	ρ	EC_{18}	T	O_2	ρ
0	422.4	19.5	6.4	998.33	293.4	20.9	7.1	998.04	260.4	21.6	6.7	997.90
1	453.0	17.8	5.8	998.66	304.2	20.1	5.6	998.22	260.3	21.1	5.6	997.99
2	481.5	18.5	5.2	998.54	351.0	19.5	4.3	998.34	260.2	20.7	5.0	998.07
3	–	–	–	–	423.4	18.9	3.1	998.44	256.0	20.3	4.1	998.16
4	–	–	–	–	–	–	–	–	258.9	20.5	3.7	998.13
5	–	–	–	–	–	–	–	–	247.9	20.4	3.8	998.14
6	–	–	–	–	–	–	–	–	239.3	20.4	3.8	998.15
7	–	–	–	–	–	–	–	–	238.7	20.3	3.6	998.17
8	–	–	–	–	–	–	–	–	231.4	21.2	3.0	997.98
9	–	–	–	–	–	–	–	–	240.7	20.3	2.6	998.17
10	–	–	–	–	–	–	–	–	245.2	20.3	2.1	998.18

Примечание. EC_{18} – электропроводность, приведенная к 18°C; T – температура, °C; O_2 – содержание кислорода, мг/л; ρ – условная плотность воды, кг/м³.

Эту область контакта разнотипных вод мы определяем как участок стратификации. Для него характерна значительная вертикальная неоднородность по гидрофизическим характеристикам водной среды – расслоение отмечается по электро-

проводности, температуре, кислороду, плотности. Вертикальный градиент электропроводности может достигать величин 100 – 150 мкСм/см на 1 м на горизонтах 2 – 3 м. Пространственное положение участка устойчивой стратификации во время вегетационного периода стабильно, его протяженность составляет ~ 700 м.

На участке стратификации 20 августа 2009 г. и 25 августа 2011 г. планктобатором объемом 5 л послойно (через 1 м) проводили отбор проб бактерио- и зоопланктона. Воду процеживали через газ с размером ячеек 64 мкм. Пробы фиксировали 4%-ным формалином, камеральную обработку проводили по стандартной методике (Методика изучения..., 1975). Количественные и структурные характеристики бактериопланктона были получены методом эпифлюоресцентной микроскопии с использованием флуорохрома ДАФИ (Porter, Feig, 1980).

Параллельно с отбором проб измеряли электропроводность и температуру воды, содержание растворенного кислорода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2009 г. при глубине участка стратификации 3.5 м горизонт 0 – 1 м представлял собой слой смешанных вод реки (электропроводность вод на участке свободного течения реки 525 мкСм/см) и водохранилища (электропроводность вод водохранилища 175 мкСм/см) (табл. 2).

Таблица 2

Вертикальное распределение показателей воды на участке стратификации устьевой области р. Ильд в 2009 и 2011 гг.

Глубина, м	2009				2011			
	Eh_{18} , мкСм/см	T , °C	O_2 , мг/л	ρ , кг/м ³	Eh_{18} , мкСм/см	T , °C	O_2 , мг/л	ρ , кг/м ³
0	314.9	17.9	7.6	998.91	214.1	26.6	10.5	996.83
1	319.6	16.4	6.2	999.12	220.4	24.5	6.9	997.38
2	418.2	16.1	5.0	999.32	225.7	24.0	4.1	997.51
3	475.8	16.1	4.1	999.38	389.0	22.8	1.0	997.95

С увеличением глубины наблюдалось уменьшение температуры воды (разница между поверхностным и придонным слоями составляла 1.8°C) и содержания растворенного кислорода (разница 3.5 мг/л).

Метеорологические особенности 2011 г. способствовали более интенсивному, чем в 2009 г., прогреву воды в поверхностных и в придонных слоях, разница между которыми составляла 3.8°C. Кроме того, заметно снижалось содержания кислорода, что особенно ярко проявлялось на границе вод и ниже (разница между поверхностным и придонным слоями составляла 9.5 мг/л), где его количество могло выступать лимитирующим фактором развития зоопланктона (см. табл. 2). При глубине участка стратификации 3.5 м смешанные воды реки и водохранилища занимали слой 0 – 2 м, а верхняя граница трансформированных вод реки находилась на глубине 3 м.

В 2009 г. наибольшее число видов, биомасса и продукция зоопланктона отмечены на верхней границе слоя трансформированных речных вод – на глубине 2 м (табл. 3).

НАРУШЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА

Таблица 3

Число видов (S), биомасса зоопланктона ($B_{зп}$, г/м³), продукция (P , кал/м³×сут) и биомасса бактериопланктона ($B_{бп}$, мг/м³) на разных глубинах участка стратификации фронтальной зоны устьевой области р. Ильдъ в 2009 и 2011 гг.

Показатели	Год	Глубина, м			
		0	1	2	3
S	2009	27	28	29	26
	2011	28	29	29	31
$B_{зп}$	2009	2.25	3.22	3.44	2.00
	2011	11.65	8.31	4.80	1.86
P	2009	235.91	224.07	313.64	126.68
	2011	818.30	320.34	208.51	169.29
$B_{бп}$	2009	320.8	206.4	236.6	468.9
	2011	487.6	483.4	658.5	428.8

В 2011 г. величины биомассы и продукции зоопланктона, а также доля коло-враток в общей биомассе были выше, чем в 2009 г. (табл. 3, 4).

Таблица 4

Число видов и доля таксономических групп зоопланктона в общей биомассе на разных глубинах участка стратификации фронтальной зоны устьевой области р. Ильдъ

Глубина, м	Таксоны					
	Rotifera		Copepoda		Cladocera	
	2009	2011	2009	2011	2009	2011
Число видов						
0	20	16	2	4	5	8
1	19	19	2	3	7	7
2	20	17	3	5	6	7
3	16	17	3	5	7	9
Доля в общей биомассе, %						
0	14.4	61.7	77.8	20.3	7.7	17.9
1	13.6	71.1	57.4	10.8	29.0	18.1
2	14.7	67.4	45.6	20.2	39.6	12.4
3	5.0	54.7	61.8	26.2	33.2	19.1

Максимальное число видов отмечено в придонном слое, а биомасса и продукция – в поверхностном. В 2009 г. в слое трансформированных водохранилищных вод (0 – 1 м) по биомассе доминировала *Asplanchna priodonta* Gosse, в области расслоения вод (2 м) – *Diaphanosoma orghidani* Negrea и *Thermocyclops oithonoides* (Sars), а в слое трансформированных речных вод (3 м) – *Th. oithonoides* (Sars). В 2011 г. по всей толще воды по биомассе преобладала *Asplanchna priodonta* Gosse при содоминировании *A. sieboldi* (Leydig) в слое над границей расслоения вод и *Bosmina longirostris* (O. F. Müller) в слое трансформированных речных вод.

Наибольшая биомасса бактериопланктона в 2009 г. регистрировалась у дна – в слое трансформированных речных вод, а в 2011 г. – на глубине 2 м – в слое смешанных вод реки и водохранилища (см. табл. 3). С увеличением глубины в

общей биомассе бактериопланктона возростала доля ассоциированных бактерий с 14.6 до 29.2%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования показали, что во фронтальной зоне устьевой области притока равнинного водохранилища формируется участок стратификации, для которого характерно наличие двух расположенных один над другим слоев воды: 1) слой менее минерализованных смешанных вод реки и водохранилища и 2) слой более минерализованных трансформированных речных вод. В нижнем слое «речных» вод уменьшается температура воды и содержание растворенного кислорода, количество которого снижается до экстремальных для гидробионтов значений в периоды, характеризующиеся высокими температурами воды. Глубина расположения границы двух слоев воды зависит в первую очередь от плотностных характеристик среды – чем более плотная вода, тем она ниже расположена (см. табл. 2).

В августе 2009 г. на границе двух слоев воды количественные показатели развития зоопланктона были наибольшими. Вероятная причина их локализации – плотностная стратификация. Как известно, повышение электропроводности происходит при увеличении минерализации воды, что, наряду с меньшими температурами, способствует возрастанию плотности и вязкости воды (Эдельштейн, 1991; Френкель, 1975). В этом случае граница трансформированных вод реки могла служить «вторым дном», на котором задерживалась часть седимента. Однако аналогичной закономерности не прослеживалось относительно сообществ бактериопланктона, максимальная биомасса которого была приурочена к придонному слою. Возможная причина заключается в выедании бактерий зоопланктоном в слое воды 0 – 2 м.

Метеорологические условия 2011 г., в частности, высокие температуры воздуха и воды, способствовали «термическому эвтрофированию», что наблюдается в водоёмах-охладителях, а также в природных водных объектах в аномально жаркие годы (Веригин, 1977; Сиренко, 1981; Безносков и др., 2002; Копылов и др., 2012). В результате этого происходили изменения планктона, наблюдаемые при эвтрофировании (Оксиюк и др., 1993; Андроникова, 1996): увеличивались биомассы бактерио- и зоопланктона, возростала продукция планктонных беспозвоночных, доля коловраток в общей биомассе. Высокая температура вызывала экстремальное снижение содержания кислорода в воде, что могло спровоцировать нарушение выявленной в 2008 г. (Крылов и др., 2009) и в 2009 г. закономерности вертикального распределения зоопланктона: концентрации наиболее богатых в количественном отношении сообществ на верхней границе более плотных трансформированных речных вод.

Максимальному количественному развитию микроорганизмов в придонных слоях, помимо отсутствия контроля «сверху», по-видимому, способствовала высокая температура – один из мощнейших экологических факторов, влияющих на численность бактериального населения (Кузнецов, 1970). В условиях непривычно высокой температуры в августе в поверхностных слоях активно отмирает фито-

НАРУШЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКТОНА

планктон, что ведет к обогащению воды органическим веществом. Последнее вызывает как усиленное размножение бактерий, так и более энергичное их дыхание, что также может приводить к резкому падению растворенного кислорода (Гидробиологический режим..., 1981). По сравнению с микробным сообществом стоячих водоёмов (Simon et al., 2002), бактериопланктон устьевой области притока равнинного водохранилища, очевидно, в большей степени зависит от поступления аллохтонного органического вещества, попадающего с водосбора притока. Кроме того, как и в реках, здесь наблюдается более тесное взаимодействие между водной толщей и дном (Экосистема малой реки..., 2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На участке стратификации во фронтальной зоне устьевой области притока равнинного водохранилища наблюдается расслоение водной массы, в результате чего верхнее положение занимают менее минерализованные трансформированные воды водохранилища, нижнее положение – более минерализованные воды притока. На границе более плотных речных вод возникает «второе дно», на котором максимального развития достигают беспозвоночные планктона, осуществляющие контроль количественного развития бактерий. Нарушение эффекта «второго дна» происходит в условиях изменения кислородного режима в периоды наибольшего прогревания воды в аномально жаркие годы.

Исследования проведены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития», подпрограмма «Биоразнообразие: состояние и динамика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андроникова И. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб. : Наука. С.-Петербург. отд-ние, 1996. 189 с.
- Безносов В. Н., Кучкина М. А., Суздалева А. Л. Исследование процесса термического евтрофирования в водоемах-охладителях АЭС // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 5. С. 610 – 615.
- Болотов С. Э., Цветков А. И., Крылов А. В. Гидрологическая и биологическая характеристика зон устьевой области притока Рыбинского водохранилища // Бассейн Волги в XXI веке : структура и функционирование экосистем водохранилищ : материалы Всерос. конф. Ижевск : Пермьяков С.А., 2012. С. 22 – 26.
- Веригин Б. В. О явлении термического евтрофирования водоемов // Гидробиол. журн. 1977. Т. 13, № 5. С. 98 – 105.
- Гидробиологический режим малых рек в условиях антропогенного воздействия. Рига : Зинатне, 1981. 166 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 год // Гидрометцентр России [Электронный ресурс] / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М., 2012. URL: <http://meteoinfo.ru/media/climate/rus-clim-2011.pdf> (дата обращения: 25.12.2012).
- Крылов А. В., Цветков А. И., Малин М. И. Вертикальное распределение зоопланктона малой реки // Поволж. экол. журн. 2009. № 1. С. 47 – 53.
- Крылов А. В., Цветков А. И., Малин М. И., Романенко А. В., Поддубный С. А., Отыкова Н. Г. Сообщества гидробионтов и физико-химические параметры устьевой области притока равнинного водохранилища // Биология внутр. вод. 2010. № 1. С. 65 – 75.

Копылов А. И., Лазарева В. И., Минеева Н. М., Масленникова Т. С., Стройнов Я. В. Влияние anomalно высокой температуры воды на развитие планктонного сообщества водохранилищ Средней Волги летом 2010 г. // Докл. РАН. 2012. Т. 442, № 1. С. 133 – 135.

Кузнецов С. И. Микрофлора озёр и её геохимическая деятельность. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1970. 440 с.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов / под ред. Ф. Д. Мордухай-Болтовского. М. : Наука, 1975. 240 с.

Михайлов В. Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М. : ГЕОС, 1997. 176 с.

Оксиук О. П., Жуковский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29, № 4. С. 62 – 76.

Рохмистров В. Л. Гидрологическая характеристика р. Солоницы в зоне подпора // Биология внутр. вод : информ. бюл. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1973. № 23. С. 57 – 59.

Рыбинское водохранилище / под ред. Б. С. Кузина. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 364 с.

Сиренко Л. А. Эвтрофирование континентальных водоёмов и некоторые задачи по его контролю // Научные основы контроля качества вод по гидробиологическим показателям. Л. : Гидрометеиздат, 1981. С. 137 – 153.

Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1975. 226 с.

Эдельштейн К. К. Водные массы долинных водохранилищ. М. : Изд-во МГУ, 1991. 139 с.

Экосистема малой реки в изменяющихся условиях среды / под ред. А. В. Крылова, А. А. Боброва. М. : Т-во науч. изд. КМК, 2007. 372 с.

Porter K. G., Feig Y. S. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora // Limnol. Oceanogr. 1980. Vol. 25, № 5. P. 943 – 948.

Simon M., Grossart H.-P., Schweitzer B., Ploug H. Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems // Aquat. Microb. Ecol. 2002. Vol. 28. P. 175 – 211.