

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА РЕК, ПРОТЕКАЮЩИХ ЧЕРЕЗ БОЛЬШОЙ ГОРОД (г. ЧЕРЕПОВЕЦ, ВЕРХНЯЯ ВОЛГА)

А. И. Копылов¹, Т. В. Иевлева², А. В. Романенко¹, Е. А. Заботкина¹

¹ Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
Россия, 1525742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок

² Череповецкий государственный университет
Россия, 162612, Вологодская обл., Череповец, Гоголя, 5
E-mail: kopylov@ibiw.yaroslavl.ru

Поступила в редакцию 19.07.13 г.

Структурно-функциональные характеристики бактериопланктона рек, протекающих через большой город (г. Череповец, Верхняя Волга). – Копылов А. И., Иевлева Т. В., Романенко А. В., Заботкина Е. А. – В течение апреля – октября 2009 – 2011 гг. были изучены структурно-функциональные особенности бактериопланктона двух малых рек и р. Шексна, протекающих через крупный промышленный г. Череповец. Численность и биомасса планктонных бактерий в малых реках в среднем за три года составили соответственно 18.7 – 18.8 млн кл/мл и 3.5 – 4.9 г/м³, в прибрежной зоне р. Шексна – 15.8 млн кл/мл и 2.2 г/м³. Продукция бактериопланктона в малых водотоках превышала таковую в р. Шексна в 1.8 – 2.2 раза. В малых загрязненных водотоках возрастает вклад бактериальных нитей в формирование общей биомассы и продукции бактериопланктона.

Ключевые слова: бактериопланктон, биомасса, численность, продукция, сезонная динамика.

Structural and functional characteristics of the bacterioplankton of rivers flowing through a large city (the city of Cherepovets, the Upper Volga region). – Kopylov A. I., Ievleva T. V., Romanenko A. V., and Zabolotkina E. A. – The structural and functional properties of the bacterioplankton in two small rivers and the Sheksna River that run through the big industrial city of Cherepovets were studied during April – October, 2009 – 2011. The three-year average numbers and biomass of planktonic bacteria in the small rivers were 18.7 – 18.8 mln cells/ml and 3.5 – 4.9 g/m³, respectively; these values in the Sheksna River's littoral zone were 15.8 mln cells/ml and 2.2 g/m³. The bacterioplankton production in the small water courses exceeded that in the Sheksna River by 1.8 – 2.2 times. The contribution of bacterial filaments to the total biomass and the total bacterioplankton production increases in small polluted rivers.

Key words: bacterioplankton, biomass, numbers, organic production, seasonal dynamics.

ВВЕДЕНИЕ

В регионе Верхней Волги одними из наиболее загрязненных водных объектов являются малые реки, протекающие в пределах крупных промышленных городов (Экологические проблемы Верхней Волги, 2001; Копылов и др., 2006). В их число входят водотоки в черте крупного промышленного центра г. Череповец. Эти реки испытывают многолетнее воздействие коммунальных и промышленных сточных вод. Результаты предыдущих гидробиологических исследований свидетельствовали об избыточном количестве поступающих в воду этих рек разнообразных органических соединений и о негативных изменениях в структуре и функционировании

планктонных и бентосных сообществ (Влияние стоков..., 1990; Дзюбан, Крылова, 2000). В то же время исследования особенностей структуры, сезонных изменений количества и продукции гетеротрофного бактериопланктона, активно участвующего в деструкции органического вещества, значительно загрязненных малых рек не проводилось.

Цель работы – оценить состояние планктонных бактериальных сообществ в двух малых реках и более крупной р. Шексна, протекающих в черте г. Череповец.

Задачи исследования:

выяснить сезонную динамику общей численности, биомассы и продукции бактериопланктона;

определить удельную скорость роста и продукцию разных групп бактериопланктона (одиночные и агрегированные бактерии, нити);

оценить вклад разных групп бактерий в общую численность, биомассу и продукцию бактериопланктона;

на основе полученных результатов оценить экологическое состояние исследованных водотоков.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в апреле – октябре 2009, 2010, 2011 гг. на трех станциях: в малой р. Серовка, в малой р. Ягорба, в которую впадает р. Серовка; на прибрежной станции крупной р. Шексна, в нее впадает р. Ягорба. Глубина станций составляла 1 м. Сразу после отбора пробу воды фиксировали глутаральдегидом до конечной концентрации 2%, хранили в темноте при температуре 4°C.

Количество гетеротрофных бактерий определяли методом эпифлуоресцентной микроскопии с использованием красителя DAPI и черных ядерных фильтров с диаметром пор 0.2 мкм (Nucleopore) (Porter, Feig, 1980). Препараты просматривали при увеличении 1000 раз под эпифлуоресцентным микроскопом Olympus BX51 (Япония) с системой анализа изображений. Определяли численность и биомассу разных групп бактерий: одиночные, агрегированные бактерии (бактерии, ассоциированные с частицами детрита и находящиеся в составе микроколоний), нити. Содержание органического углерода в сырой биомассе бактерий рассчитывали согласно уравнению, связывающему объем клетки (V , мкм³) и содержание углерода в клетке (Norland, 1993). Для расчета рациона гетеротрофных бактерий принимали коэффициент использования потребленной пищи на рост (K_2), равный 0.3 (Романенко, 1985).

Удельную скорость роста бактерий (μ , ч⁻¹) определяли в экспериментах с использованием антибиотика зукариот тирама (Копылов, Крылова, 1993; Newell et al., 1983). Конечная концентрация антибиотика в пробах воды составляла 2 мг/л. Время экспозиции составляло 18 – 24 ч. Эксперименты проводили в двух повторностях. Величину μ для одиночных и агрегированных бактерий находили по изменению численности клеток, для нитей – по изменению их биомассы. Продукцию бактерий рассчитывали как произведение μ и биомассы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследованных городских реках обнаружены очень высокие концентрации планктонных бактерий (рис. 1, 2; табл. 1). В течение апреля – октября общая чис-

ленность и биомасса бактериопланктона на исследованных станциях в реках существенно колебались (см. рис. 1, 2). Максимальные и минимальные величины численности и биомассы отличались в р. Серовка соответственно в 2.8 – 6.1 и 7.7 – 19.4 раз, в р. Ягорба – 3.0 – 4.1 и 3.7 – 17.1 раз, в р. Шексна – 2.5 – 7.7 и 3.1 – 19.3 раз. Наиболее высокие величины численности бактериопланктона наблюдались, как правило, во второй половине июля (см. рис. 1). В р. Шексна наблюдалась более тесная положительная связь между численностью бактерий и температурой воды ($R = 0.60$, $n = 29$, $p = 0.05$), чем в р. Серовка ($R = 0.37$, $n = 29$, $p = 0.05$) и р. Ягорба ($R = 0.46$, $n = 29$, $p = 0.05$). Средний объем бактериальных клеток в течение периода исследования существенно варьировал (см. табл. 1), поэтому сезонная динамика биомассы бактериопланктона отличалась от таковой численности бактериопланктона. В малых реках наиболее высокие величины биомассы бактериопланктона были обнаружены в конце августа. Сезонная динамика биомассы бактериопланктона в р. Шексна характеризовалась наличием нескольких максимумов (см. рис. 2). В р. Шексна наблюдалась более тесная положительная связь между биомассой бактерий и температурой воды ($R = 0.45$), чем в р. Серовка

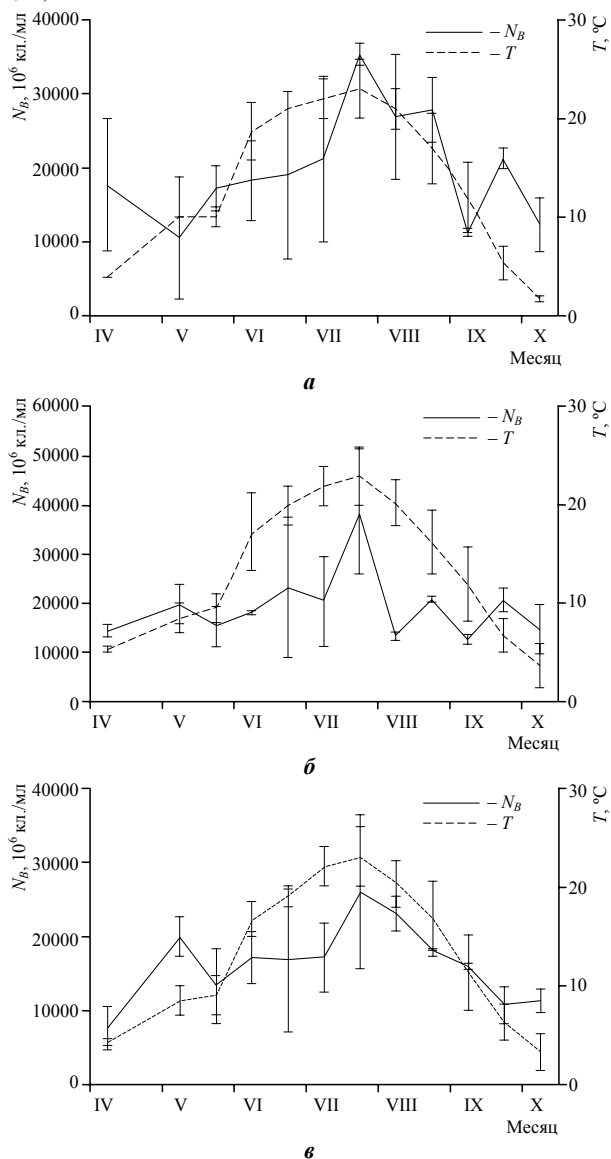


Рис. 1. Сезонные изменения температуры воды на поверхности (T , °C) и общей численности бактериопланктона (N_b , 10^6 кл./мл) р. Серовка (а), Ягорба (б), р. Шексна (в) (в среднем за 2009 – 2011 гг.)

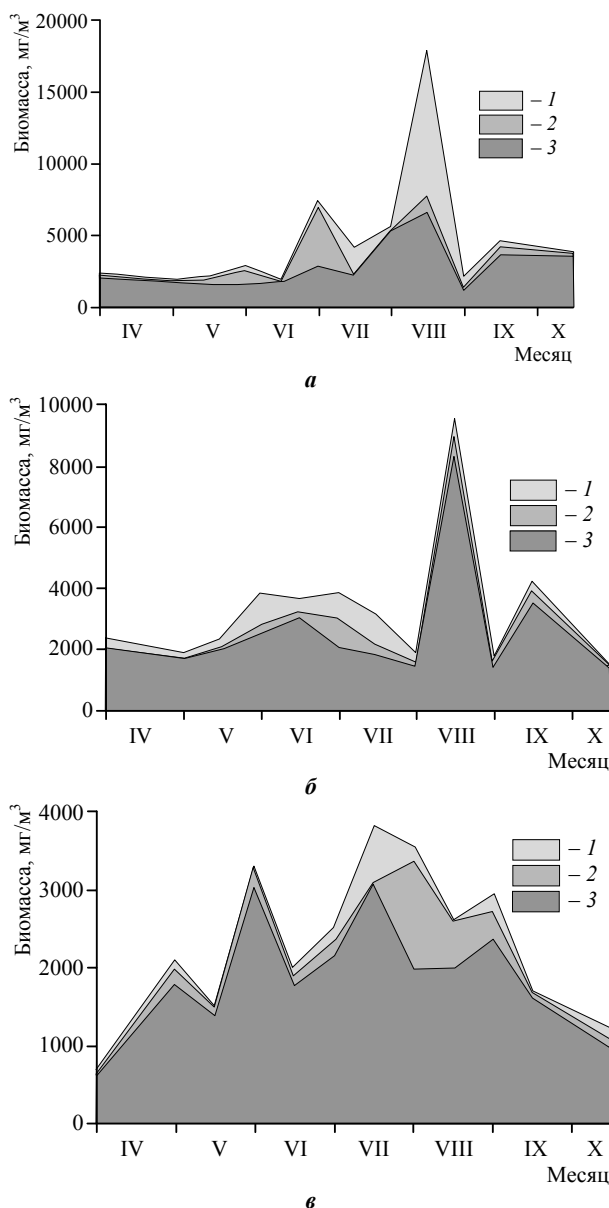


Рис. 2. Сезонные изменения биомассы (B , мг/м^3) разных групп бактериопланктона в р. Серовка (*а*), Ягорба (*б*), Шексна (*в*) в 2011 г.: 1 – нити, 2 – агрегированные бактерии, 3 – одиночные бактерии

($R = 0.27$) и р. Ягорба ($R = 0.25$).

Величины общей численности бактериопланктона, рассчитанные в среднем за три года, в малых реках превышали таковую на прибрежной станции в р. Шексна только в 1.2 раза. В то же время средний объем бактериальных клеток в малых реках существенно превышал таковой в р. Шексна. В итоге величины общей биомассы бактериопланктона, средние за три года, в первых двух реках были выше, чем в р. Шексна в 1.5 – 2.2 раза.

На всех станциях в 2010 г., когда температура воды на поверхности рек летом достигала 26 – 27°C, величины общей численности и биомассы бактериопланктона были выше, чем в 2009 г., соответственно в 1.4 – 1.7 и 1.4 – 2.2 раз, а по сравнению с 2011 г. – соответственно в 1.1 – 1.2 и 1.4 – 1.9 раз. Летом 2010 г. количество бактерий в воде малых рек достигало очень высоких величин: 38.82 – 51.63 млн кл./мл и 21.96 – 26.99 г/м^3 .

Согласно «Комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши» (Оксиюк и др., 1993) величины численности планктонных бактерий, полученные в данной работе, свидетельст-

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА

вуют о том, что вода в реках Серовка и Ягорба соответствует категориям «весьма грязная» и «предельно грязная», а в прибрежной зоне р. Шексна – категориям «сильно загрязненная» и «весьма грязная».

Таблица 1

Численность (N_B , 10^6 кл./мл), средний объем клетки (V , $\mu\text{км}^3$), биомасса (B_B , мг/м^3) бактериопланктона в реках (T – температура воды на поверхности, $^{\circ}\text{C}$)

Параметры	2009	2010	2011	Среднее за 3 года
р. Серовка				
$T, ^{\circ}\text{C}$	$\frac{1.0 - 24.0}{12.1 \pm 2.7}$	$\frac{2.0 - 26.0}{15.1 \pm 2.7}$	$\frac{2.0 - 21.0}{12.3 \pm 2.1}$	13.2 ± 1.0
N_B	$\frac{5.94 - 36.08}{14.94 \pm 3.13}$	$\frac{6.12 - 38.82}{21.71 \pm 2.90}$	$\frac{12.17 - 33.84}{19.90 \pm 2.54}$	18.85 ± 2.02
V	$\frac{0.104 - 0.358}{0.222 \pm 0.025}$	$\frac{0.087 - 1.241}{0.339 \pm 0.099}$	$\frac{0.074 - 0.671}{0.200 \pm 0.060}$	0.259 ± 0.043
B_B	$\frac{959 - 12805}{3323 \pm 1227}$	$\frac{1393 - 26993}{7370 \pm 2362}$	$\frac{1784 - 13798}{3978 \pm 1263}$	4890 ± 1254
р. Ягорба				
$T, ^{\circ}\text{C}$	$\frac{1.0 - 24.0}{11.7 \pm 5.5}$	$\frac{6.0 - 27.0}{15.6 \pm 2.5}$	$\frac{2.0 - 22.0}{12.5 \pm 2.2}$	13.3 ± 1.2
N_B	$\frac{6.66 - 21.61}{13.34 \pm 1.63}$	$\frac{12.58 - 51.63}{23.12 \pm 3.24}$	$\frac{12.72 - 37.70}{19.70 \pm 2.64}$	18.72 ± 2.87
V	$\frac{0.106 - 0.398}{0.196 \pm 0.039}$	$\frac{0.060 - 1.031}{0.190 \pm 0.084}$	$\frac{0.090 - 0.359}{0.171 \pm 0.028}$	0.185 ± 0.008
B_B	$\frac{1091 - 4088}{2622 \pm 354}$	$\frac{1282 - 21962}{4398 \pm 1798}$	$\frac{1441 - 6641}{3361 \pm 576}$	3460 ± 515
р. Шексна				
$T, ^{\circ}\text{C}$	$\frac{1.0 - 22.0}{11.2 \pm 2.4}$	$\frac{4.0 - 26.0}{15.7 \pm 2.4}$	$\frac{2.0 - 20.0}{11.6 \pm 2.1}$	12.8 ± 1.4
N_B	$\frac{6.47 - 20.76}{12.12 \pm 1.71}$	$\frac{4.71 - 36.48}{19.40 \pm 2.4}$	$\frac{10.48 - 26.26}{16.01 \pm 1.66}$	15.84 ± 2.10
V	$\frac{0.104 - 0.254}{0.160 \pm 0.018}$	$\frac{0.053 - 0.292}{0.149 \pm 0.020}$	$\frac{0.069 - 0.184}{0.120 \pm 0.011}$	0.141 ± 0.011
B_B	$\frac{667 - 3779}{1938 \pm 386}$	$\frac{336 - 6497}{2889 \pm 547}$	$\frac{981 - 3079}{1915 \pm 275}$	2247 ± 321

Примечание. В числителе – минимальная – максимальная величины, в знаменателе – средняя величина $\pm$ ошибка.

В исследованных реках в среднем за вегетационный сезон в общей численности бактериопланктона (N_B) значительно преобладали одиночные клетки (84 – 94%). Доля агрегированных бактерий в N_B на всех станциях и во все годы, как правило, находилась в пределах 10 – 15%. Вклад нитей в N_B не превышал 0.5% и в малых реках был выше, чем в р. Шексна, в 3 – 4 раза. Одиночные бактерии в среднем за вегетационный сезон также составляли основную часть общей биомассы бактериопланктона (B_B). Доля агрегированных бактерий в B_B изменялась в разные годы от 5 до 21% от B_B , но рассчитанные для каждой реки в среднем за три года

существенно не отличались (табл. 2). В то же время вклад нитей в B_B , благодаря их большим объемам, был значительным. В малых реках доля нитей в B_B была существенно выше, чем в р. Шексна (см. табл. 2).

Таблица 2

Доля разных групп бактерий в общей биомассе бактериопланктона в реках, %

Группа бактерий	2009	2010	2011	Среднее за 3 года
р. Серовка				
Одиночные	$\frac{43.1 - 90.9}{80.2 \pm 4.6}$	$\frac{8.8 - 96.0}{42.1 \pm 9.8}$	$\frac{48.0 - 93.6}{66.4 \pm 4.5}$	62.9 ± 11.1
Агрегированные	$\frac{3.6 - 23.7}{13.6 \pm 2.0}$	$\frac{0.1 - 74.2}{22.5 \pm 8.4}$	$\frac{0.6 - 23.4}{12.3 \pm 2.4}$	16.1 ± 3.2
Нити	$\frac{0.1 - 33.2}{6.2 \pm 3.5}$	$\frac{1.0 - 91.1}{35.4 \pm 8.5}$	$\frac{1.9 - 40.6}{21.3 \pm 4.6}$	21.0 ± 8.4
р. Ягорба				
Одиночные	$\frac{37.5 - 91.6}{69.7 \pm 5.7}$	$\frac{57.9 - 97.6}{87.2 \pm 4.4}$	$\frac{55.1 - 88.1}{71.7 \pm 3.5}$	76.2 ± 5.5
Агрегированные	$\frac{3.2 - 59.0}{22.6 \pm 6.3}$	$\frac{0.6 - 10.8}{5.4 \pm 1.1}$	$\frac{1.6 - 20.2}{7.4 \pm 2.2}$	11.8 ± 5.4
Нити	$\frac{0.3 - 17.0}{7.7 \pm 1.8}$	$\frac{1.6 - 31.9}{7.4 \pm 3.6}$	$\frac{3.0 - 43.3}{20.9 \pm 4.9}$	12.0 ± 4.4
р. Шексна				
Одиночные	$\frac{39.8 - 98.0}{73.9 \pm 5.4}$	$\frac{71.8 - 100}{85.2 \pm 3.3}$	$\frac{73.9 - 94.3}{82.7 \pm 2.4}$	80.6 ± 3.4
Агрегированные	$\frac{1.6 - 50.1}{21.7 \pm 5.0}$	$\frac{0 - 27.8}{8.9 \pm 2.9}$	$\frac{2.5 - 22.5}{11.8 \pm 2.1}$	14.1 ± 3.9
Нити	$\frac{0.2 - 19.2}{4.4 \pm 2.3}$	$\frac{0 - 26.5}{5.9 \pm 2.5}$	$\frac{0.5 - 13.6}{5.5 \pm 1.7}$	5.3 ± 0.4

Примечание. В числителе – минимальная – максимальная величины, в знаменателе – средняя величина $\pm$ ошибка.

В течение вегетационного сезона соотношение биомасс разных групп бактерий в общей биомассе изменялось (см. рис. 2). В р. Серовка в первую половину лета значительный вклад в B_B вносили агрегированные бактерии (в среднем за три года до 39.5% от B_B), во вторую половину лета – нити (до 56.5% от B_B). В некоторых случаях доля нитей в B_B достигала 91.1% (28.08.10), а агрегированных бактерий – 74.2% (08.07.10). В р. Ягорба наиболее высокие доли (в среднем за три года) агрегированных бактерий (24.4%) и нитей (31.9%) в B_B обнаружены в июле (см. рис. 2). В некоторых случаях доля нитей в B_B достигала 43.3% (16.06.11), а агрегированных бактерий – 59.0% (15.07.09). В р. Шексна существенное участие агрегированных бактерий в формировании B_B наблюдалось в августе (39.4%), а нитей – в конце июля (18.7%). Максимальные величины достигали соответственно 50.1% от B_B (07.08.09) и 26.5% от B_B (28.07.10). Таким образом, планктонные бактериальные сообщества исследованных малых городских рек и прибрежной зоны р. Шексна отличаются от таковых в более чистых водоёмах и водотоках региона Верхней Волги (Копылов, Косолапов, 2008; Стройнов и др., 2011) значительно более высо-

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА

кими величинами биомассы агрегированных бактерий и нитей, а также их вкладом в общую биомассу бактериопланктона. Следует отметить, что высокое содержание в составе водной микрофлоры бактериальных нитей характерно для очистных сооружений (Никитина, 2010).

В исследованных реках среди рассматриваемых групп бактерий наиболее высокие величины удельной скорости роста были зарегистрированы у нитей. В среднем за период исследования удельная скорость роста нитей превышала таковую у одиночных бактерий в 1.1 – 1.7 раз, а агрегированных бактерий – в 1.5 – 1.8 раз (табл. 3). Во всех реках между температурой воды и удельной скоростью роста бактерий существовала высокая положительная зависимость: у одиночных бактерий $R = 0.84 - 0.94$, агрегированных бактерий $R = 0.69 - 0.87$, нитей $R = 0.68 - 0.97$.

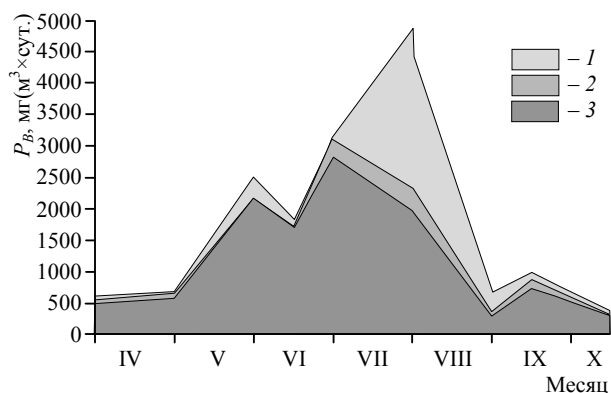
Таблица 3

Общая продукция бактериопланктона (ΣP , мг/(м³ × сут.), удельные скорости роста (μ , ч⁻¹) и продукции (P_1 , мг/(м³ × сут.)) разных групп бактерий в реках в апреле – октябре 2011 г.

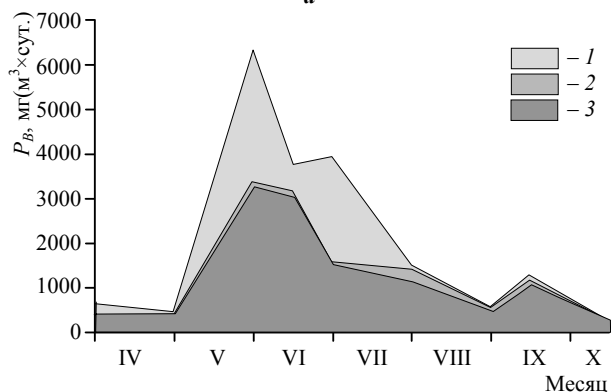
ΣP	$\Sigma P/\Sigma B$	Группа бактерий	μ	P_1	$P_1/\Sigma P$
р. Серовка					
$\frac{333 - 4836}{1719 \pm 504}$	$\frac{0.13 - 0.91}{0.48 \pm 0.10}$	Одиночные	$\frac{0.005 - 0.040}{0.020 \pm 0.004}$	$\frac{268 - 2789}{1202 \pm 311}$	$\frac{39.5 - 91.8}{69.9 \pm 6.3}$
		Агрегированные	$\frac{0.005 - 0.021}{0.012 \pm 0.002}$	$\frac{6 - 415}{127 \pm 45}$	$\frac{0.2 - 13.8}{7.4 \pm 1.5}$
		Нити	$\frac{0.009 - 0.047}{0.022 \pm 0.004}$	$\frac{37 - 2512}{390 \pm 268}$	$\frac{1.2 - 51.9}{22.7 \pm 5.8}$
р. Ягорба					
$\frac{259 - 6319}{2089 \pm 702}$	$\frac{0.17 - 0.98}{0.51 \pm 0.11}$	Одиночные	$\frac{0.007 - 0.039}{0.019 \pm 0.004}$	$\frac{223 - 3240}{1257 \pm 380}$	$\frac{37.2 - 86.1}{60.2 \pm 5.2}$
		Агрегированные	$\frac{0.007 - 0.054}{0.020 \pm 0.005}$	$\frac{9 - 302}{110 \pm 30}$	$\frac{1.4 - 20.2}{5.3 \pm 2.4}$
		Нити	$\frac{0.007 - 0.072}{0.032 \pm 0.008}$	$\frac{12 - 2941}{722 \pm 374}$	$\frac{4.2 - 60.3}{34.5 \pm 6.7}$
р. Шексна					
$\frac{131 - 2533}{945 \pm 248}$	$\frac{0.13 - 0.93}{0.46 \pm 0.09}$	Одиночные	$\frac{0.005 - 0.034}{0.018 \pm 0.004}$	$\frac{96 - 2377}{765 \pm 232}$	$\frac{59.5 - 93.8}{81.0 \pm 3.8}$
		Агрегированные	$\frac{0.007 - 0.051}{0.020 \pm 0.005}$	$\frac{17 - 315}{104 \pm 38}$	$\frac{2.3 - 25.1}{11.0 \pm 2.4}$
		Нити	$\frac{0.007 - 0.083}{0.029 \pm 0.009}$	$\frac{7 - 286}{76 \pm 29}$	$\frac{0.6 - 27.5}{8.0 \pm 2.8}$

Примечание. В числителе – минимальная – максимальная величины, в знаменателе – средняя величина ± ошибка.

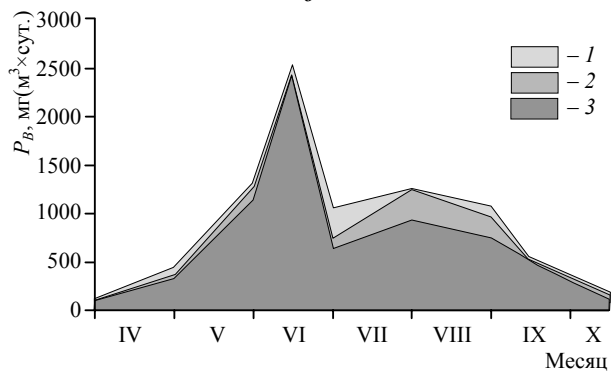
В то же время абсолютные величины продукции одиночных клеток, как правило, существенно превышали таковые у других групп бактерий. Их доля в общей продукции бактериопланктона в среднем превышала таковую у агрегированных бактерий в 7.4 – 11.4 раз, нитей – 1.7 – 10.0 раз. Вклад нитей в суммарную продукцию бактериопланктона в малых реках был заметно выше, чем в р. Шексна. В итоге абсолютные величины общей продукции бактериопланктона в реках Серовка и



а



б



в

Рис. 3. Сезонное изменение продукции (P_B , мг/(м³ × сут.)) разных групп бактерий в р. Серовка (а), Ягорба (б), Шексна (в) в 2011 г.: 1 – нити, 2 – агрегированные бактерии, 3 – одиночные бактерии

Ягорба были выше, чем в р. Шексна, в 1.8 – 2.2 раз, но величины отношения продукции к биомассе отличались незначительно.

В реках сезонная динамика общей продукции бактериопланктона (ΣP) отличалась (рис. 3). В р. Серовка наиболее высокие величины ΣP обнаружены 17 июля (3120 мг/(м³ × сут.)) и 20 августа (4836 мг/(м³ × сут.)). В первом случае основной вклад в общую продукцию бактериопланктона вносили одиночные клетки (85.0% от ΣP), во втором – одиночные клетки (39.5% от ΣP) и нити (51.9% от ΣP). В р. Ягорба также наблюдались два максимума продукции бактерий: 16 июня (6319 мг/(м³ × сут.)) и 17 июля (3932 мг/(м³ × сут.)). В первом случае основной вклад в общую продукцию бактериопланктона вносили одиночные клетки (51.3% от ΣP) и нити (46.5% от ΣP), во втором – нити (60.3% от ΣP). В р. Шексна наибольшая величина продукции планктонных бактерий зарегистрирована 29 июня (2533 мг/(м³ × сут.)). Основная доля в ΣP принадлежала одиночным бактериям (93.8%). Связь между температурой воды и ΣP в реках Ягорба ($R = 0.82$) и Шексна ($R = 0.95$) была более сильной, чем в р. Серовка ($R = 0.54$).

Гетеротрофные бактерии активно участвуют в биологическом самоочищении природных вод. Допуская, что коэффициент использования усвоенной пищи на рост у бактерий равен 0.30 (Романенко, 1985), мы рассчитали, что в течение периода исследования в р. Серовка бактериопланктон ассимилировал органическое вещество в количестве от 0.21 до 2.32 (в среднем 1.08 ± 0.28) г С/(м³ × сут.), при этом на дыхание использовал от 0.14 до 1.62 (в среднем 0.76 ± 0.19) г С/(м³ × сут.), в р. Ягорба соответственно от 0.14 до 3.37 (в среднем 1.32 ± 0.42) г С/(м³ × сут.) и от 0.10 до 2.36 (в среднем 0.92 ± 0.29) г С/(м³ × сут.), в р. Шексна соответственно от 0.10 до 1.85 (в среднем 0.68 ± 0.18) г С/(м³ × сут.) и от 0.07 до 1.29 (в среднем 0.47 ± 0.13) г С/(м³ × сут.). В итоге в результате энергетического обмена гетеротрофных бактерий концентрация растворенного органического вещества в реках за период исследования (164 сут.) снизилась: в р. Серовка на 125 г С/м³, в р. Ягорба на 151 г С/м³ и р. Шексна на 77 г С/м³. Разрушение органического вещества планктонной микрофлорой в основном происходило в летние месяцы (78 – 85% от общего количества РОВ, используемого бактериями на дыхание).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В малых реках и прибрежной зоне р. Шексна, протекающих через крупный промышленный центр г. Череповец, обнаружен очень высокий уровень развития гетеротрофного бактериопланктона, свидетельствующий о значительном загрязнении водотоков органическим веществом. В малых реках в летний период биомасса планктонных бактерий достигала рекордно высоких величин: 22 – 27 г/м³. В составе бактериопланктона наиболее загрязненной малой р. Серовка присутствовало значительное количество агрегированных бактерий (бактерий, ассоциированных с частицами взвеси и находящихся в составе микроколоний) и нитевидных бактерий, биомасса которых иногда значительно превышала таковую у одиночных бактерий. В исследованных водотоках скорость роста более крупных бактериальных нитей была заметно выше, чем у более мелких одиночных и агрегированных бактерий. Нитевидные бактерии играют значительную роль в структуре и функционировании бактериопланктона малых загрязненных рек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Влияние стоков Череповецкого промышленного узла на экологическое состояние Рыбинского водохранилища. Рыбинск : Госкомиздат РСФСР, 1990. 156 с.

Дзюбан А. Н., Крылова И. Н. Оценка состояния бактериопланктона и бактериобентоса Рыбинского водохранилища в районе г. Череповец (Вологодская обл.) // Биология внутренних вод. 2000. № 4. С. 68 – 78.

Копылов А. И., Крылова И. Н. Структура бактериопланктона Рыбинского водохранилища // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб. : Гидрометеоиздат, 1993. С. 141 – 173.

Копылов А. И., Косолапов Д. Б., Романенко А. В., Косолапова Н. Г., Мыльникова З. М., Минеева Н. М., Крылов А. В. Гетеротрофные микроорганизмы в планктонных трофических сетях речных экосистем // Успехи современной биологии. 2006. Т. 126, № 3. С. 273 – 284.

Копылов А. И., Косолапов Д. Б. Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги. М. : Изд-во Современного гуманитарного ун-та, 2008. 377 с.

Никитина О. Г. Биоэстимация : контроль процесса биологической очистки и самоочищения воды. М. : МАКС Пресс, 2010. 288 с.

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

Романенко В. И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органиче- ского вещества во внутренних водоемах. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. 295 с.

Стройнов Я. В., Романенко А. В., Масленникова Т. С., Копылов А. И. Вирио- и бакте- риопланктон малой реки : влияние вирусов на смертность гетеротрофных бактерий // Био- логия внутренних вод. 2011. № 3. С. 22 – 29.

Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль : Изд-во Яросл. гос. техн. ун-та, 2001. 427 с.

Newell S. Y., Sherr B. F., Sherr E. B., Fallon R. D. Bacterial response to presence of eu- karyote inhibitors in water from a coastal marine environment // Marine Environmental Research. 1983. Vol. 10. P. 147 – 157.

Norland S. The relationship between biomass and volume of bacteria // Handbook of Meth- ods in Aquatic Microbial Ecology / eds. P. Kemp, B. Sherr, E. Sherr, J. Cole. Boca Raton : Lewis Publishers, 1993. P. 303 – 308.

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