

РОЛЬ ФИТО- И ЗООПЛАНКТОНА В ПРОЦЕССАХ САМООЧИЩЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОЧИСТНЫХ ПРУДОВ)

Н. М. КРЮЧКОВА

(Белорусский госуниверситет, Минск)

Все виды загрязнения водоемов органическими веществами вызывают сильно выраженные процессы биологического самоочищения, в которых принимают участие различные группы организмов. Общеизвестно, что бактерии и другие микроорганизмы играют основную роль в процессах самоочищения, в которых участвуют также зоо- и фитопланктон, но относительное значение отдельных видов и сообществ планктонных организмов в них еще недостаточно хорошо выяснено.

Влияние планктонных организмов на процессы самоочищения особенно заметно при массовом развитии отдельных видов, например, в условиях биологических очистных прудов. Вода в таких прудах часто имеет интенсивную зеленую окраску благодаря обильному развитию одного или нескольких видов фитопланктона; численность их может достигать 300 млн. кл/мл [32]. На последних стадиях очистки вода прудов иногда окрашена в красно-коричневый цвет, что вызвано огромным количеством дафний или мoin, численность которых иногда составляет несколько десятков тысяч экземпляров в 1 л [4, 20, 32].

Химический состав воды изменяется в зависимости от того, господствует ли в пруду фито- или зоопланктон [30, 36].

При массовом развитии фитопланктона в верхних слоях воды пруда часто наблюдается перенасыщение ее (до 300%) кислородом. Валовая первичная продукция у поверхности достигает и даже превышает такие величины, как, например, 45 мг O_2 /л·сутки. Однако вследствие низкой прозрачности (эффект самозатенения) средняя интенсивность фотосинтеза оказывается много меньше, например, 7 мг O_2 /л·сутки. Основным потребителем кислорода на дыхание в этих условиях являются сами водоросли (до 20 мг O_2 /л·сутки). В связи со значительным потреблением бикарбонатной CO_2 при фотосинтезе рН воды может достигать 11. При интенсивном развитии водорослей свет может проникать лишь на очень малую глубину, поэтому нижние слои воды не обогащаются кислородом за счет фотосинтеза. На глубине, куда проникает мало света, располагаются опустившиеся водоросли. Здесь скапливается много способных к загниванию органических веществ и господствует резко выраженная восстановительная среда. По наблюдениям Ульманна [31], в биологических прудах уже на глубине 50 см может содержаться большое количество сероводорода при высоком содержании кислорода в верхних слоях воды.

К положительным для самоочищения моментам развития водорослей следует отнести то, что они обогащают воду кислородом, необходимым для существования всей водной жизни [1, 3], для минерализации органических веществ [5, 16], способствуют снижению концентрации хлоридов при доочистке сточных вод, выделяют метаболиты, многие из которых обладают бактерицидными свойствами.

Зоопланктон также может оказывать существенное влияние на кислородный режим водоема, его термические условия, количественное развитие бактерио- и фитопланктона и, отдавая продукты обмена в воду, способствовать значительному повышению содержания углекислоты, органического азота и фосфора, созданию условий для массового развития водорослей после его гибели.

При длительном сроке содержания воды в прудах в массовом количестве могут развиваться дафнии («дафниевая стадия» пруда). Присутствие ветвистоусых раков — *Daphnia pulex*, *D. magna*, *Moina rectirostris* — влияет на режим пруда в направлении обратном влиянию фитопланктона. По мнению Ульмана, большие скопления дафний (от 500 до нескольких тысяч экз/л) в состоянии противодействовать термической и химической стратификации и вызывать вертикальное перемешивание воды, способствуя обогащению ее кислородом. Но это уже вторичное действие. Первоначально массовое развитие зоопланктона в опытных прудах приводит к заметному снижению содержания кислорода в воде, что осуществляется двумя путями. Первый путь — потребление кислорода на дыхание. Так, по данным Климович [17], коловратки при численности до 74,3 тыс. экз/л способны за сутки потребить на дыхание до 5,7 мг О₂. При наших исследованиях на биологических очистных прудах Солигорска, Полоцка и Городеи [4] дыхание ветвистоусых раков измерялось огромными величинами, например 20—30 мг О₂/л·сутки.

Кроме прямого потребления кислорода на дыхание, содержание его может уменьшаться в связи с выеданием большого количества фитопланктона и соответственно снижением фотосинтеза. Способность *D. pulex* и *Brachionus calyciflorus* быстро снижать численность водорослей в прудах в опытных условиях была показана еще Пеннингтоном [25]. То же явление внезапного падения численности фитопланктона прудов, благодаря чему первоначально зеленая вода становилась прозрачной, наблюдал Ито [14] в угревых прудах префектуры Мие (Япония). Содержание кислорода сильно снижалось, и это вызывало гибель рыб. Объяснение данному явлению Ито видит в резком увеличении численности коловратки *Brachionus plicatilis*, выедавшей водоросли в воде пруда. Эти выводы были подтверждены экспериментально [15]. Аналогичное явление массовой гибели рыб наблюдали Кришнамурти с соавт. [18—20] в водоеме, принимавшем хозяйственно-бытовые сточные воды (Индия). Гибель рыбы по времени совпала с массовым развитием зоопланктона. В это время максимальная численность ветвистоусых раков (*Moina dubia*) составляла около 16 тыс. экз/л, веслоногих (родов *Diatomus*, *Calanus*) — до 17 тыс. экз/л, в массовом количестве были представлены коловратки. Рост обилия зоопланктона сопровождался внезапным снижением численности фитопланктона и содержания растворенного кислорода (до 0—0,2 мг/л), что и явилось первопричиной гибели рыб. Все эти данные свидетельствуют о необходимости принимать во внимание дыхание зоопланктона при изучении кислородного баланса пруда.

При массовом развитии *D. magna* и *D. pulex* [31, 32] в прудах «гетеротрофного типа» содержание кислорода в воде довольно постоянно сохраняется на уровне 0,2—1,0 мг/л, вода прозрачна и бедна

фитопланктоном и бактериями, БПК низкое. Однако в тех случаях, когда в воде у поверхности содержится только 0,2—1,0 мг O_2/l и отсутствует перемешивание ее на глубине 1,8 м, непосредственно над грунтом еще содержится 0,2 мг O_2/l . Даже такого незначительного количества кислорода достаточно, чтобы препятствовать редукации фосфатов. Из сравнения скорости поступления кислорода из воздуха и потребления его дафниями очевидно, что на «дафниевой стадии» очистки воды нижние ее слои быстро лишились бы кислорода без постоянного пополнения его запасов. По экспериментальным данным и наблюдениям на прудах Ульманн приходит к выводу, что в этих условиях только турбулентное движение, создаваемое самими дафниями, препятствует полному исчезновению кислорода. По его мнению, присутствие дафний в количестве 1—2 экз/л так аэрирует воду, что в водоеме сохраняются аэробные условия. Поэтому ветвистоусые рачки рассматриваются Ульманном как фактор, в значительной степени определяющий кислородный режим загрязненных вод. Их значение для кислородного режима особенно возрастает при теплой и тихой погоде. В отличие от дафний, по наблюдениям того же автора, коловратки не могут обеспечить необходимого им количества кислорода за счет турбулентного движения. Способность дафний создавать такое движение воды — пример механизма, с помощью которого популяция автоматически влияет на среду в благоприятном для себя направлении.

Таким образом, с жизнедеятельностью дафний связано присутствие даже в наиболее глубоких слоях пруда некоторого количества кислорода. Дафнии в это время держатся преимущественно у дна, поскольку при отсутствии водорослей они потребляют детрит и бактерий. Так как сами дафнии в значительной степени используют кислород на дыхание, насыщение воды кислородом в придонных слоях незначительно, что может остановить процесс нитрификации. В лабораторных условиях Шатгауэр и Бик [26] как раз и наблюдали временную задержку процесса нитрификации в аквариумах с *D. magna* и *D. pulex* по сравнению с сосудами, заполненными искусственно загрязняемой фекальными стоками водой при отсутствии рачков.

Численность бактерий на «дафниевой стадии» очистки воды невысока. Особенно резко сокращается концентрация коли-форм и энтерококков [6, 9, 12, 13, 22]. Их численность снижается на 99,5% по сравнению с начальным количеством в поступающей воде. Это дало основание Ульманну сравнивать зоопланктон с естественным бактериальным фильтром. Следует учитывать это свойство зоопланктона, и для достижения высоких бактериальных показателей очистки длительное время (до 30—40 дней) выдерживать сточную жидкость в биологических прудах [2, 29, 33]. Создаются предпосылки для признания полезности массового развития зоопланктона, обуславливающего существенное улучшение бактериальных показателей очищаемой воды, в которой коли-титр приближается к стандарту для питьевых вод, и устранение избыточной биомассы фитопланктона. Существенное влияние зоопланктона на среду состоит еще и в том, что он отдает в воду продукты обмена. В эксперименте показано [11], что морские веслоногие рачки *Calanus finmarchicus* и *C. helgolandicus* при питании водорослями в концентрации, соответствующей среднегодовому их уровню в водах Английского пролива у Плимута, экскретировали до 12,4 мкгN/мг сухого веса за сутки. Причем эта цифра возрастает с увеличением концентрации пищи. В опытах с *C. finmarchicus* была также изучена экскреция фосфора [24]. За 20 дней жизни рачки были способны выделить в морскую воду количество фосфора, равное содержанию его в их телах.

Мартин [23], выясняя влияние популяции зоопланктона на фитопланктон в естественных условиях, пришел к заключению, что оно осуществляется двумя путями: регуляцией биомассы водорослей путем фильтрации (преобладает с мая по сентябрь) и обогащением воды питательными веществами через экскрецию азота и фосфора, что способствует зимне-весеннему развитию водорослей. Очевидно, наиболее ощутимой экскреция биогенов должна быть в прудах, где зоопланктон развивается в огромном количестве.

При больших скоплениях животные способны перемешивать воду, препятствуя осаднению водорослей и увеличивая, таким образом, их фотосинтетическую активность. Как показали наши наблюдения в условиях загрязняемого Добротворского водохранилища, фотосинтез планктона в присутствии циклопа *Acanthocyclops gigas* значительно повышался. Особенно заметная (более чем в два раза) стимуляция валового фотосинтеза была отмечена на глубине 1 и 1,5 м, куда проникало менее 1% света [4]. Ледольф [21] считает, что *Cladocera* выполняют наиболее важную функцию среди массовых видов в биологических прудах. Они одинаково активно на свету и в темноте потребляют водоросли, благодаря чему в воду проникает больше света, и таким образом усиливается фотосинтетическая активность водорослей.

Важную роль коловраток в процессах очистки отмечал Калавей [7]. Он подчеркивал, что коловратки в отличие от прикрепленных инфузорий способны потреблять комочки и хлопья бактерий; это позволяет им существовать в воде высоких степеней очистки, где почти нет одиночных бактерий.

Как показали недавние исследования Коновера [10], морской зоопланктон способен потреблять мелкодисперсную эмульгированную в воде нефть, что не оказывает отрицательного влияния на его жизненные функции. Согласно полученным данным, около 20% всей накопившейся на дне нефти было осаждено в составе фекалий животных.

Резюмируя сказанное, напомним, что участие зоопланктона в самоочищении водоемов может выражаться, во-первых, в потреблении бактерий, и это ведет, с одной стороны, к сокращению численности последних, с другой — стимулирует размножение и процессы бактериальной очистки. Во-вторых, выедавая значительное количество фитопланктона и потребляя кислород на дыхание, животные в ряде случаев оказывают существенное влияние на кислородный режим пруда. Зоопланктон благодаря своей фильтрационной деятельности, способствует осаднению некоторых веществ, в частности, эмульгированной в столбе воды нефти. Следует напомнить об участии животных в минерализации органического вещества, которая осуществляется в процессе дыхания. Кроме того, в ряде случаев зоопланктон может оказать заметное стимулирующее влияние на валовой фотосинтез планктона, увеличивая фотосинтетическую активность водорослей. Даже простое (и неполное) перечисление функций животных свидетельствует о том, что роль зоопланктона в процессах круговорота вещества и энергии в водоеме весьма велика и многообразна.

Таким образом, на ряде примеров было показано, что очистка загрязненных вод может осуществляться и в биологических прудах гетеротрофного типа за счет деятельности зоопланктона. Такие пруды на практике встречаются среди конечных звеньев каскадно расположенных биологических прудов и среди прудов с малой нагрузкой и большим сроком содержания в них жидкости. Они дают сток лучшего качества в отношении бактериологических показателей, устранения избыточной биомассы фитопланктона и т. д., чем одиночные пруды с малым сроком содержания в них жидкости. Однако в гетеротрофных

прудах атмосферная аэрация служит единственным источником кислорода, поэтому нагрузка на них не может быть велика. Отрицательная особенность таких прудов — напряженный кислородный режим. При постоянном дефиците кислорода легко создаются анаэробные условия, и это ведет к гибели зоопланктона. В последнем случае в прудах создаются условия для массового развития фитопланктона, который, в свою очередь, может быть через некоторое время потреблен развившимися планктонными рачками.

Интересный пример длительно действующей серии очистных проточных прудов в г. Лунде приводит Венстрем [29]. Очистка с помощью этих прудов на протяжении всего года была практически на одном уровне. Первые пруды, где в массе развивались зеленые и синезеленые водоросли, несли основную нагрузку. Однако в осенние месяцы возрастала роль самого большого, четвертого пруда, где фитопланктон выедался *Daphnia magna*, развившейся летом в массе. В первых прудах основную роль в очистке играла фотосинтетическая аэрация, в последнем — потребление фитопланктона и бактерий инфузориями и ракообразными. Автор подчеркивает их большое значение в очистке. Кроме того, ветвистоусые рачки образуют незагнивающие осадки. Отмечена большая роль дафний в четвертом пруду при очистке фенольных сточных вод в серийных прудах [28].

Эффективность очистки сточных вод в биологических прудах, достигаемая при участии всего населения водоема, очень высока. Как показали в своих исследованиях Мовад с соавт. на примере серийных очистных биологических прудов г. Александрии [27], эффективность стабилизации органического вещества связана с особенностями метаболических отношений в системе фитопланктон — зоопланктон. По мнению этих авторов, очистная способность прудов снижается в период, когда одно из звеньев системы проходит стадию климакса.

Все сказанное свидетельствует о том, что, помимо общеизвестного значения микробиологических процессов, в самоочищении водоемов большую роль играет жизнедеятельность фито- и зоопланктона. Как показывают приведенные примеры, в определенных условиях фито- или зоопланктон приобретает решающее значение для процессов самоочищения. Однако во всех случаях этот процесс представляет собой общий результат жизнедеятельности всего микробного, растительного и животного населения водоема или водотока. Относительное значение отдельных компонентов экосистемы для самоочищения в определенных условиях подлежит изучению с широким использованием современных эколого-физиологических методов как основы количественных показателей участия отдельных видовых популяций и сообществ в процессах трансформации вещества и энергии и самоочищения воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винберг Г. Г. 1955. Значение фотосинтеза для обогащения воды кислородом при самоочищении загрязненных вод. Тр. ВГБО, 6.
2. Его же. 1966. Общие сведения о биологических прудах. В кн.: «Биол. пруды в практ. очистки сточн. вод», Минск.
3. Винберг Г. Г., Сивко Т. Н. 1956. Фитопланктон как агент самоочищения загрязненных вод. Тр. ВГБО, 7.
4. Крючкова Н. М. 1968. Роль зоопланктона в процессах самоочищения водоемов. Автореф. дисс., Бел. гос. ун-т, Минск.
5. Сивко Т. Н. 1961. Значение фотосинтеза планктона для самоочищения загрязненных вод. Автореф. дисс., Бел. гос. ун-т, Минск.
6. Vožko L., Kalisz L., Sucheska T. 1966. Les étangs biologiques en tant que troisième degré d'épuration des eaux d'égouts. «Verh. Int. Ver. theoret. und angew. Limnol.», 16, 2.
7. Calaway W. T. 1968. The metazoa of waste treatment processes-rotifers. «J. Water Pollut. Control. Federat.», 40, 11.

8. Cabridenc R., Lepailleur H. 1969. Rôle des algues dans l'épuration biologique des eaux. «Terres et eaux», 22, 58.
9. Canter L. M., Englande A. J. Jr., Mauldin A. F. 1969. Loading rate on waste stabilization ponds. «J. Sanit. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.», 95, 6.
10. Conover R. J. 1971. Some relations between zooplankton and bunker C oil in Chedabucto Bay following the wreck of the tanker Arrow. «J. Fish. Res. Bd. Canada», 28.
11. Corner E. D. S., Cowey C. B., Marshall S. M. 1965. On the nutrition and metabolism of zooplankton. III. Nitrogen excretion by *Calanus*. «J. Marine Biol. Assn. U.K.», 45, 2.
12. Ehrlich S. 1966. Two experiments in the biological classification of stabilization pond effluents. «Hydrobiologia», 27, 1—2.
13. Ferrier D. A., Ralston J. 1970. Biological sewage treatment. «N. Z. Eng.», 25, 10.
14. Ito T. 1955. Studies on the «Mizukawari» in eel-culture ponds. I. The feeding activity of *Brachionus plicatilis* on phytonannoplankton (as cause of «Muzukawari»). «Rep. Fac. Fisch. Univ. Prefect. Mie», 2, 1.
15. Ito T. 1957. The relation of between the growth of *Brachionus plicatilis* and the quantity of phytoplankton. «Rep. Fac. Fisch. Univ. Prefect. Mie», 2, 3.
16. Kalisz L., Suchecka T. 1966. L'importance de certains organismes de phytoet zooplankton dans le processus d'épuration des eaux d'égouts dans les étangs biologiques. «Verh. Int. Ver. theoret. und angew. Limnol.», 16, 2.
17. Klimowicz H. 1968. Occurrence of rotifers (Rotatoria) in sewage ponds. «Polskie Arch. hydrobiol.», 15, 3.
18. Krishnamoorthy K. P., Visweswara G. 1963. Hydrobiological studies with reference to sudden fish mortality. «Hydrobiologia», 21, 3—4.
19. Krishnamoorthy K. P., Visweswara G. 1966. Hydrobiological studies in Gandhisagar (Jumma Tank)—seasonal variation in plankton (1961—1962). «Hydrobiologia», 27, 3—4.
20. Krishnamoorthy K. P., Visweswara G. 1965. Hydrobiological studies in Gandhisagar (Jumma Tank) diurnal variation in plankton. «Hydrobiologia», 25, 1—2.
21. Loedolff C. Z. 1964. Function of Cladocera in oxidation ponds. «J. Water Poll. Control. Federat.», 36, 3.
22. Malone J. R., Bailey T. L. 1969. Oxidation ponds remove bacteria. «Water and Sewage Works», 116, 4.
23. Martin J. H. 1965. Phytoplankton-zooplankton relationships in Narragansett Bay. «Limnol. and Oceanogr.», 10, 2.
24. Marshall S. M., Orr A. P., Conover R. I. 1961. On the biology of *Calanus finmarchicus*. XII. The phosphorus cycle excretion, egg production, autolysis. With an Addendum. The turnover of phosphorus by *Calanus finmarchicus*. «J. Mar. Biol. Assn. U.K.», 41.
25. Pennington W. 1941. The control of the number of freshwater phytoplankton by small invertebrate animals. «J. of Ecology», 29, 2.
26. Scheithauer E., Bick H. 1964. Ökologische Untersuchungen an *Daphnia magna* und *Daphnia pulex* in Freiland und in Laboratorium. «Sbornik VSChT», 8, 1.
27. Sobhi Moawad K., El-Baroudi Hassan M. 1969. Stabilization efficiency of sewage ponds in series. «Water Res.», 3, 9.
28. Sörensen J. 1950. Über biologische Reinigung phenolhaltiger Abwasser. «Kungliga Fysiogr. Sällskapet i Lund Forhand.», 20.
29. Wennström M. 1955. Oxidation ponds in Sweden. «Lund Univ. Arsskrift. N.F.», 51, 7.
30. Uhlmann D. 1954. Zur Kenntnis der natürlichen Nahrung von *Daphnia magna* und *Daphnia pulex*. «Zs. Fischer.», 3.
31. Uhlmann D. 1958—1959. Untersuchungen über die biologische Selbstreinigung häuslichen Abwassers in Teichen. «Wiss. Z. der Karl Marx Univ. Math. 6. Nat. Wiss.», Leipzig, 8, 1.
32. Uhlmann D. 1961. Über den Einfluss von Planktonorganismen auf ihr Milieu. «Intern. Revue ges. Hydrobiol.», 46, 1.
33. Uhlmann D. 1965. Beitrag zur Limnologie extrem nährstoffreichen Flachgewässer. I. Sauerstoff, Nährstoffe. «Wiss. Z. Univ. Math.-Nat. Wiss.», Leipzig, 14, 2.
34. Uhlmann D. 1966. Beitrag zur Limnologie extrem nährstoffreichen Flachgewässer. II. Plankton-Massenwechsel. «Wiss. Z. Univ. Math. Nat. Wiss.», Leipzig, 14, 3.
35. Uhlmann D. 1966. Produktion und Atmung im hypertrophen Teich. «Verh. Int. Ver. theoret. und angew. Limnol.», 16, 2.
36. Uhlmann D. 1958. Die biologische Selbstreinigung in Abwasserteichen. «Verh. Int. Ver. Limnol.», 13.