

НАУКА И ЧЕЛОВЕК

Учредитель: Российская Академия Гуманитарно-Прикладных Наук

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ 1 РАЗ В КВАРТАЛ

ДЕКАБРЬ 2011 ГОДА

№ 1 (1)

С.А.Остроумов

Москва 119991, Московский университет им. М.В.Ломоносова, биологический факультет

УДК 574.6: 574.635 : 574.632.017: 628.1

Опубликовано: Остроумов С.А. Доказательство решающей роли биоты в улучшении качества воды // Вода технология и экология. 2010, № 1, с. 32-62.



1. ВВЕДЕНИЕ.

Для решения задач обеспечения экологической безопасности источников водоснабжения, для сохранения и улучшения качества воды необходимы знания механизмов того, как в экологических системах происходит формирование качества воды.

На формирование качества воды в источниках водоснабжения, влияющего на здоровье водопользователей [91], большое влияние оказывают процессы, в которых участвуют гидробионты [5, 14, 32, 35, 41, 79, 82, 86, 102, 114]. В условиях антропогенного воздействия [24, 41, 44, 92, 93, 104, 108, 116] состояние гидробионтов зависит от многих факторов, включая воздействие загрязняющих веществ [38]. В качестве загрязняющих веществ могут выступать ксенобиотики многих химических классов, в том числе детергенты, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и другие поллютанты.

Результаты исследований автора [41, 45, 47, 48, 49, 50, 54] и данные, приведенные в [9], свидетельствуют о негативном воздействии ПАВ и ПАВ-содержащих препаратов на представителей основных функциональных блоков экосистем, включающих в себя как автотрофные [9, 68, 71], так и гетеротрофные организмы [45, 47, 48, 54]. При интерпретации полученных результатов необходима большая осторожность и существуют факторы, которые могут повлиять на проявление биологических эффектов синтетических ПАВ (СПАВ) в более сложных системах. Поэтому недопустим прямой перенос результатов, полученных в лабораторных условиях, на природные экосистемы.

На необходимость осторожности при интерпретации опытов обращали внимание многие исследователи [34, 77, 85, 88, 89], анализирующие результаты лабораторных опытов в целях понимания ситуации в экосистемах в условиях антропогенного загрязнения. При этом рассматривались некоторые прикладные проблемы, связанных с очищением воды, а также при оценке потенциальной экологической опасности антропогенных воздействий на водную биоту.

2. САМООЧИЩЕНИЕ ВОДЫ И РОЛЬ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ (ГИДРОБИОНТОВ) В ПОДДЕРЖАНИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Существует несколько вариантов определения понятия "самоочищение воды". согласно одному из них, это "весь комплекс биологических, физических и химических процессов, обуславливающих способность водоемов освобождаться от загрязнений, вносимых сточными водами и образующихся вследствие жизнедеятельности аборигенных организмов" [38], согласно другому, "самоочищение воды водоемов –

очистке воды в результате естественных биологических и физико-химических процессов, трансформации органических и отчасти неорганических веществ" [88]. Важную роль в понимании процессов самоочищения играют результаты ряда исследований [10, 14, 32, 79].

Природные экосистемы функционируют далеко не в идеальной обстановке, подвергаясь воздействию антропогенного химического загрязнения. В России общая мощность очистных сооружений позволяет очищать ~ 28 км³ воды в год. При этом изымается из поверхностных водных объектов ~ 97 км³ и сбрасывается в природные водоемы > 76 км³ воды в год [94] (~37% загрязненной воды подвергается очистке). Сохраняется важность и острая необходимость сбережения самоочистительного потенциала водных объектов России, так как в четырех регионах Европейской части (Калужская, Нижегородская и Саратовская области, а также Калмыкия и Мордовия) при обследовании источников хозяйственно-питьевого водоснабжения более чем в 40% случаев выявлено несоответствие их качества (по химическим показателям) нормативным требованиям. Еще на 14 территориях Поволжья частота выявления случаев несоответствия воды нормативам превышает средний по РФ уровень 27.7% [91].

После прохождения загрязненных вод через очистные сооружения далеко не всегда достигается полная их очистка [75]. В Москве (РФ) из проверенных (на выпуске в водоемы) 184 очистных сооружений 88 (> 30%) не удовлетворяли установленным требованиям по сбросу сточных вод в водоемы [75]. Таким образом, важнейшая функция природных экосистем - окончательная очистка вод.

Процессы самоочищения водных экосистем важны не только с точки зрения поддержания качества воды как ресурса для водопотребления, но и с точки зрения поддержания нормальных местообитаний, необходимых для сохранения биоразнообразия.

2.1. Участие гидробионтов в процессах поддержания качества воды и ее очищения

Очищение водной среды, улучшение качества воды включает в себя следующие процессы:

(1) физические и физико-химические процессы [54], в том растворение и разбавление; вынос загрязняющих веществ (ЗВ) на берег и в сопредельные водоемы; сорбцию ЗВ взвешенными частицами с последующей седиментацией; сорбцию ЗВ донными осадками; испарение ЗВ;

(2) химические процессы [7, 82, 90], в том числе гидролиз ЗВ; фотохимические превращения; редокс-каталитические превращения; превращения с участием свободных радикалов; связывание ЗВ растворенными органическими веществами (РОВ), ведущее к уменьшению токсичности ЗВ; химическое окисление ЗВ с участием кислорода;

(3) биологические процессы [4, 6, 10, 11, 14, 17, 30, 32, 40, 42, 74, 80, 86, 98, 101, 111]), в том числе сорбцию и накопление гидробионтами ЗВ и биогенов; биотрансформацию (редокс-реакции, разрушение, конъюгация); минерализацию органического вещества; внеклеточную ферментативную трансформацию ЗВ; удаление взвешенных частиц и ЗВ из столба воды в результате фильтрации воды гидробионтами; удаление ЗВ из столба воды в результате сорбции пеллетами, экскретируемыми гидробионтами; поглощение бентосом биогенов, ведущее к предотвращению или замедлению выхода биогенов и ЗВ из донных осадков в воду; биотрансформацию и сорбцию ЗВ в почве - при поливе земель загрязненными водами; регуляторные воздействия на другие компоненты системы самоочищения воды, в том числе на организмы (перечень неполон; явления взаимосвязаны и отдельные процессы могут быть выделены только условно в целях анализа и изучения).

Важная дополнительная информация об упомянутых выше процессах приведена в [5, 33, 35, 114].

В процессах, которые формально относятся к физическим или химическим, на самом деле существенную роль играют биологические факторы [48, 49, 50].

Автором выдвинута концепция, согласно которой водная экосистема - аналог крупномасштабного диверсифицированного биореактора с функцией очищения воды [52], а также сформулирована концепция полифункциональной роли гидробионтов (и водной биоты в целом) в очищении воды водных экосистем [61, 65, 105].

В самоочищении участвуют практически все группы гидробионтов, включая микроорганизмов. Доля бактериопланктона в трансформации ОВ возрастает от эвтрофных к олиготрофным водоемам [1]. Роль микроорганизмов детально анализировали [10, 11, 40, 113, 114].

Скорости распада ЗВ формируются с участием практически всех компонентов экосистемы и рассматриваются в качестве одной из ее интегральных характеристик (обзор см. в [54]).

В некоторых работах вклад гидробионтов в самоочищение рассматривается как некий постоянный фактор, не зависящий от вредного воздействия на организмы веществ, загрязняющих экосистему [96]. Однако биологические факторы самоочищения в экосистемах в современных условиях находятся под влиянием многих обстоятельств, в том числе загрязнения водной среды. При воздействии загрязняющих веществ формируется состав экосистем загрязненных водных объектов. Еще в 1908 г. Р. Кольквитцем и М. Марссоном разработана шкала оценки загрязненности водоемов по присутствию в них тех или иных организмов (обзор см. в [54]).

Опыты по характеристике биологических эффектов анионных ПАВ (АПАВ), неионных ПАВ (НПАВ), катионных ПАВ (КПАВ) и смесевых препаратов (пеномоющих средств, ПМС), выявляемых при их воздействии на гидробионтов [54] были нами проведены с использованием организмов, участвующих в процессах самоочищения водной среды [48, 49, 50, 74].

При определенных условиях СПАВ и другие поллютанты оказывают различные воздействия на гидробионтов (ведут к ингибированию роста, изменению поведения и т.д.), что может сказываться на процессах очищения воды. С этой точки зрения важны и планктонные, и бентосные организмы.

Один из важных факторов самоочищения водных экосистем – функциональная активность планктонных организмов. Бактерио-, фито- и зоопланктон участвуют во многих процессах, ведущих к очищению воды (перечислены выше).

Фильтрационная активность планктона исследовалась и оценивалась многими авторами [17, 86]. В частности, было установлено, что коловратки могут профильтровывать тот объем воды, где они находятся, до 7.7 раз в сутки (обзор см. в [54]). Планктонные ракообразные профильтровывают в сутки, в зависимости от типа водного объекта, от 5 до 90% объема [17]. Нижняя оценка фильтрационной активности (5%) означает, что весь объем водоема фильтруется одними только ракообразными за 20 дней, что совпадает с оценкой, сделанной В.Г. Богоровым для верхней части (0-500 м) Мирового океана (см. обзор [54]).

Планктон - объект прямого и косвенного воздействия ЗВ. Прямое воздействие поллютантов на фитопланктон было рассмотрено в [9, 107] и во многих других работах. Автором выявлено и исследовано воздействие ПАВ на *S. quadricauda* (воздействие додецилсульфата натрия, ДСН), *M. lutheri* (эффект КПАВ этония) [71], морские цианобактерии *Synechococcus* (эффект НПАВ TX-100) [87], на эвглену *E. gracilis* (воздействие синтетического моющего средства СМС "Био-С", "Кристалл") [13, 68], *Dunaliella asymmetrica* (воздействие сульфонола) [67], на морских диатомовых *Talassiosira pseudonana* (эффект НПАВ TX100) [54].

Косвенно воздействовать на фитопланктон загрязняющие вещества могут, так как его численность зависит от многих абиотических и биотических факторов, в том числе от скорости выедания беспозвоночными-фильтраторами [15, 17], в частности бентосными фильтраторами [4, 6, 14, 42, 111].

2.2. Роль бентосных фильтраторов в формировании качества воды и ее очищении

Бентосные фильтраторы оказывают кондиционирующее воздействие на качество воды, извлекая из нее взвеси различной природы. Усвояемость корма бентосными фильтраторами варьирует в широких пределах, составляя для некоторых пресноводных моллюсков около 40-47% [42]. Остальная часть отфильтрованного органического материала экскретируется и в виде пеллет поступает в донные отложения, что делает фильтраторов участниками значительных биогеохимических потоков, связанных с извлечением взвешенного вещества из воды.

В исследованиях в Северной Америке установлено, что дрейссены (*Dreissena*) в западной части оз. Эри (до 50 тыс экз. на 1 м²) потребляли в сутки в 2-4 раза больше фитопланктона, чем его наблюдаемая биомасса на 1 м² (см. обзор [54]). По другим оценкам, популяции дрейссены (*Dreissena polymorpha*) профильтровывают ежедневно 70-125 % объема столба воды [42, 111]. Двустворчатые моллюски сем. *Corbiculidae* в североамериканских пресноводных экосистемах профильтровывают 0.3 – 10 м³ воды в день над 1 м² дна, при плотности популяции 1-30 г/м² (сухой вес без раковин) [111]. Моллюски оз. Красного (*Unio tumidus*, *U. pictorum*, *Anodonta complanata*) отфильтровывают летом 123-174 г взвешенного ОВ в слое воды над 1 м² дна (см. обзор [54]). В оз. Байкал слой воды высотой 12 м профильтровывается губками приблизительно за 1.2 дня (см. обзор [54]). Моллюски Днепровско-Бугского лимана (Черное море) профильтровывают объем лимана за вегетационный сезон > 16 раз [3]). Придонный слой воды мощностью 3 м профильтровывается мидиями Черного моря на некоторых участках приблизительно за 30 ч [20]). В Чесапикском заливе в США (объем 71.7 x 10⁹ м³) устрицы *Crassostrea virginica* до начала их активного промысла профильтровывали весь объем залива за 3.3 дня, причем около 30% углерода отфильтрованного сестона экскретировалось как компактные биоотложения, становясь доступным для бентической пищевой сети [98].

Скорость фильтрации асцидиями *Styela clava* (средний вес животного 179 мг сухого веса) составляла в опытах 0.38 мл/сек, скорость фильтрации полихетами *Sabella penicillus* (средний вес животного 65 мг сухого веса, температура при измерении фильтрации 20°C) 2.17 мл/сек (см. обзор [54]). Суммарная фильтрация воды макробеспозвоночными (моллюски, асцидии, полихеты) составляет обычно 1-10 м³ / (м² день) [54].

Бентосные фильтраторы могут вносить вклад в регулирование процессов, связанных с эвтрофированием водной среды и массовым цветением токсичных видов планктона [54].

Фильтрация воды в экосистеме важна для самоочищения водного объекта и регулирования процессов, участвующих в нем, что проявляется в следующем:

- 1) Вместе со взвесями седиментируются адсорбированные и поглощенные ими поллютанты.
- 2) Уменьшается мутность воды, улучшаются условия для проникновения видимого света и ультрафиолета (УФ) и вызываемых ими воздействий на гидробионтов и ОВ.

- 3) Уменьшается содержание тонкодисперсных взвесей в воде, что благоприятно для повышения качества воды. В противном случае, при повышении содержания взвесей в воде снижается скорость фильтрации всех изученных биофильтраторов [4, 86].
 - 4) Усиливается перемешивание воды, которое сказывается на аэрации воды, на фито- и зоопланктоне; в постоянно перемешиваемом резервуаре наблюдаются более высокие концентрации фитопланктона, снижение концентрации биогенов и зоопланктона.
 - 5) Улучшается аэрация воды и условия для потребления кислорода, что способствует окислению ОВ.
 - 6) Регулируется видовой состав и обилие конкретных видов альгобактериального сообщества, от которого в свою очередь зависит скорость генерации и разрушения перекиси водорода и скорость свободнорадикального самоочищения.
 - 7) Экскретируются компоненты РОВ.
 - 8) Благодаря усвоению бентосными биофильтраторами фито- и бактериопланктона, экскреции биофильтраторами пеллет фекалий и псевдофекалий ускоряется седиментация ОВ.
 - 9) Активный рост и функциональная активность моллюсков-биофильтраторов способствует развитию и функционированию гетеротрофных бактерий в нижерасположенной зоне экосистемы [48,49,50, 54].
- Вышесказанное имеет большое экологическое значение. Так, формирование определенной прозрачности воды важно для проникновения УФ-радиации и реализации биологических эффектов УФ-радиации в водной среде. Уменьшение количества взвесей необходимо, поскольку взвеси негативно действуют на многих гидробионтов [4, 16, 39, 86, 117]. Избыток взвеси в воде может увеличивать токсичность ЗВ. Так, при наличии взвеси бентонитовой глины (БГ, 50 мг/л; частицы < 2 мкм) токсичность гербицида глифосата для *Daphnia pulex* возрастала более чем вдвое. В присутствии взвеси БГ значение ЕС50 (48 ч, 15°C) было равно 3.2 мг/л, а в среде без взвеси БГ – 7.9 мг/л (см. обзор [54]).
- Эти данные показывают, что необходимо исследовать вопрос о том, может ли подавляться фильтрационная активность гидробионтов под воздействием антропогенных факторов, в том числе химического загрязнения.

2.3. Воздействие загрязняющих веществ на фильтраторов

Результаты опытов автора показали ингибирование фильтрационной активности гидробионтов при воздействии АПАВ, НПАВ, КПАВ, СМС, ПМС и жидких моющих средств (ЖМС) [54]. Автором были получены также новые данные об ингибировании фильтрации воды гидробионтами при воздействии тяжелых металлов

Поллютанты (в частности АПАВ, НПАВ, КПАВ, металлы) воздействуют на скорость фильтрации воды и тем самым на скорость изъятия клеток фитопланктона из экосистемы. СПАВ способны ингибировать фильтрацию воды *M. edulis*, *M. galloprovincialis*, *C. gigas*, *U. tumidus* и *U. pictorum* [54, 55, 66, 95, 101, 104]. Показана статистическая значимость эффектов СПАВ [50, 54].

Результаты данных опытов согласуются с полученными при изучении воздействия иных ЗВ на другие виды моллюсков [39, 112]. Различные ЗВ вызывают увеличение пребывания моллюсков с сомкнутыми створками - (см. обзор [89]). В опытах автора также наблюдалось смыкание створок *M. edulis* при концентрации ПАВ ДСН 20 мг/л. Эта концентрация

значительно выше, чем те концентрации (1-2 мг/л), которых было достаточно для ингибирования скорости фильтрации. Соединение ртути (ацетат метилртути, 0.4 - 2.8 мг/л) снижало выедание диатомовых водорослей моллюсками *M. edulis* (см. обзор [89]).

При воздействии ДДТ на черноморскую мидию наблюдали ослабление фильтрации воды (см. обзор [54]). Скорость фильтрации морской воды мидиями *Mytilus edulis* ингибируют пестициды линдан, эндрин, карбарил, дихлорвос, флуцитринат, перметрин (Donkin et al. 1997, цит. по [54]), трибутилолово и дибутилолово [115]). Автор обнаружил новые эффекты подавления фильтрации воды мидиями *M. galloprovincialis* при воздействии тяжелых металлов. Подавление биофильтрации воды двустворчатыми моллюсками под воздействием ЗВ показано и другими авторами [39, 110].

Загрязнение среды приводит к тому, что организмы-фильтраторы выпадают из состава макрозообентоса на загрязненных участках рек и водохранилищ [54], что в конечном счете снижает фильтрационную активность бентического сообщества.

Многолетние исследования верхней Волги показали, что в водных экосистемах с неудовлетворительным экологическим состоянием (сильное токсическое загрязнение или высокая нагрузка ОВ на водоем) в составе зооперифитона практически отсутствуют фильтраторы (моллюски, мшанки, губки) [81]. Биомасса фильтраторов резко снижалась в водоемах Фенноскандии при повышении концентрации фосфора (Робщ) в воде, снижении рН, и токсификации (вблизи источников загрязнения тяжелыми металлами) [94].

Есть сведения о воздействии ЗВ на фильтрационную активность планктона [37, 88, 95].

Скорости фильтрации воды и питания пресноводного ракообразного *Daphnia magna* клетками *Chlamydomonas reinhardtii* были чувствительны к пиретроиду фенвалерату [95]. Изменение скорости питания дафний (*Daphnia magna*) клетками хлореллы при воздействии гербицида сатурна (0.001 - 0.1 мг/л), инсектицидов ДДТ (0.1 - 1 мг/л) и метафоса (2 мг/л), а также при действии сульфата меди показано [37] с

использованием метода замедленной флуоресценции. Этот метод был успешно апробирован при изучении биоэффектов многих ЗВ [36], в том числе СПАВ [76].

СПАВ ТДТМА ингибировал фильтрационную активность коловраток двух видов, *Brachionus angularis* и *Brachionus plicatilis* [28].

На фильтрационную активность гидробионтов может оказать воздействие поступление в водную среду биогенных веществ, содержащих N и P. Последние стимулируют развитие и увеличение биомассы фитопланктона. Для нескольких групп организмов-фильтраторов установлено, что увеличение концентрации пищевых частиц (например, концентрации клеток фито- и бактериопланктона) вызывает снижение скорости фильтрации [4, 86].

Механизмы самоочищения воды, как отмечалось, включают в себя процессы, которые проходят при участии гетеротрофных бактерий, цианобактерий, водорослей, жгутиковых, планктонных и бентических биофильтраторов. Изменения численности, скоростей роста и питания гидробионтов [42] и скоростей выделения ими пеллет фекалий и псевдофекалий [106], а также изменение соотношения видов в составе водных биоценозов при воздействии СПАВ не могут оставаться без последствий для процессов самоочищения. Для последних важны трофическая активность [42] и двустворчатых, и легочных моллюсков, которые образуют значительное количество пеллет, под действием гравитации быстро оседающих на дно, благодаря чему вносится вклад в изъятие из пелагиали органического вещества потребляемых в качестве пищи организмов [3, 98, 99, 100, 111]. Доказано увеличение скорости оседания пеллет по сравнению со скоростью седиментации отдельных клеток фитопланктона и их фрагментов [18, 33].

2.4. Воздействие загрязняющих веществ на другие организмы

На многих организмах, в том числе на автотрофных и гетеротрофных гидробионтах и других организмах установлены и охарактеризованы биологические эффекты при воздействии водной среды, содержащей синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ). Так, при изучении воздействия СПАВ на автотрофные организмы установлено ингибирование роста диатомовых *Thalassiosira pseudonana* (Hustedt) Hasle et Heimdal, эвгленовых, нарушение роста и развития покрытосеменных растений, в том числе ингибирование удлинения проростков растений (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench, *Lepidium sativum* L., *Oryza sativa* L. и др.) и роста водных макрофитов (*Pistia stratiotes* L.).

При изучении воздействия ПАВ на проростки высших растений нами обнаружено нарушение морфогенетических процессов в ризодерме, ведущих к образованию корневых волосков.

При изучении воздействия СПАВ на гетеротрофные микроорганизмы нами установлено ингибирование роста бактерий (протейкобактерий *Nurphomonas* sp.).

В работах по изучению воздействия КПАВ на аннелид вы выявили изменение поведения аннелид *Nirudo medicinalis* L..

Факт дифференциальной биологической активности антропогенных веществ по отношению к организмам различных экологических групп особенно существен при комплексном загрязнении водной среды [88], в том числе при загрязнении СМС, когда в воду вместе со СПАВами поступает и фосфор. В определенных условиях СМС (содержащие ПАВ и соединения P) могут стимулировать рост водорослей. Например, СМС Tide-Lemon в концентрации 1-100 мг/л стимулировал рост *Synechocystis* sp. PCC 6803 [31]. Аналогичные данные независимо получены для некоторых морских микроводорослей [2]. Потенциально опасна ситуация, когда рост фитопланктонных организмов стимулируется (благодаря поступлению P), а фильтрационная активность, ведущая к изъятию фитопланктона из водного столба, ингибируется (под действием ПАВ). Стабильная численность водорослей возможна лишь при балансе факторов, ведущих к увеличению численности, и факторов, вызывающих снижение последней (к числу таких факторов относится выедание водорослей консументами, включая бентосные фильтраторы). поэтому при одновременном поступлении в воду и ПАВ, и P возникает опасность дисбаланса между процессами, определяющими состояние фитопланктона в загрязняемой водной среде [56], что будет благоприятствовать цветению водорослей.

Учитывая разнообразие биологических эффектов, оказываемых СПАВ при их воздействии на представителей всех основных групп гидробионтов, приходим к пониманию того, что водная биота (включая и микро-, и макроорганизмы) является лабильным и уязвимым компонентом в системе самоочищения воды, причем среди уязвимых звеньев оказываются двустворчатые моллюски, фильтрующие воду [46, 62, 63, 64, 65, 101] и другие организмы.