

Связь ПРОЦЕССОВ САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕПАРАЦИИ

В работе получены экспериментальные результаты, доказывающие, что один из важнейших процессов репарации на экологическом уровне (восстановление качества воды в ходе процесса изъятия гидробионтами взвеси из воды) ингибируется загрязняющим веществом (ксенобиотиком). Это указывает на элемент аналогии с процессами репарации на генетическом уровне, которые также могут нарушаться ксенобиотиками и характеризуются некоторыми другими свойствами, аналогичными особенностям экологической репарации. Ксенобиотики, оказывающие негативное воздействие на процессы важные для экологической репарации качества воды, включали различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), детергенты, тяжелые металлы и др. Приводятся экспериментальные данные о воздействии тетрадецилтриметиламмонийбромиды на фильтрационную активность мидии природной гибридной популяции *Mytilus edulis* × *M. galloprovincialis*.

Введение

В пресноводных и морских экосистемах происходят процессы самоочищения [1-7], благодаря которым система поддерживает качество воды [3, 5]. Биотические процессы самоочищения являются природной биоремедиацией экосистемы [6 – 10]. В водные экосистемы ежегодно поступает аллохтонное органическое вещество в виде частиц размером более 0,5 мкм (*particulate organic matter*, POM). Поступление аллохтонного POM может составлять 89 кг на 1 га поверхности водоема в год, например, в озере Лоренс (Lawrence Lake, Мичиган, США [3]). В реке поступление POM может достигать около 5900 т обеззоленного сухого вещества на участке реки (New River, США) протяженностью 135 км (с учетом вещества, поступающего с притоками) [3]. К этому добавляется поступление аутохтонного POM, которое достигает величины около 5000 т обеззоленного сухого вещества на том же участке реки протяженностью 135 км [3]. Вклад фитопланктона в поступление POM в

С.А. Остроумов*,
д.б.н., ведущий
научный сотрудник
биологического
факультета
Московского
государственного
университета
им. М.В. Ломоносова

воду может составлять 43 г углерода на 1 м² площади водоема в год, например, в озере Лоренс [3]. Это вещество должно удаляться из столба воды в ходе природных процессов самоочищения. На экосистемном уровне организации жизни происходят процессы ремедиации, восстановления и, в широком смысле слова, экологической репарации («ремонта») системы [3 – 6], что порождает целесообразность поиска аналогий при сопоставлении этих процессов с процессами репарации на других уровнях организации жизни. Цель данного сообщения – анализ некоторых особенностей экологической репарации (деятельности биотического блока системы самоочищения) на примере процесса изъятия из воды взвеси при фильтрации воды моллюсками с использованием результатов опытов, в которых применялся ингибиторный анализ экологических взаимодействий организмов [8]).

Получены новые результаты, показывающие, что один из процессов экологической репарации качества воды (процесс изъятия гидробионтами взвеси из воды) ингибируется загрязняющими веществами (ксенобиотиками), что указывает на некоторый элемент аналогии с процессами репарации на генетическом уровне, которые также могут нарушаться ксенобиотиками. Возможность и правомерность такой аналогии была отмечена и обоснована нами ранее.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования фильтрационной активности моллюсков проводили по методике, описанной в [5, 10].

Изучали изменение скорости фильтрации воды моллюсками из природной гибридной популяции мидий *Mytilus edulis* × *M. galloprovincialis* при воздействии катионного поверхностно-активного вещества (ПАВ) тетрадецилтриметиламмоний бромиды

* Адрес для корреспонденции: saostro@online.ru



(ТДТМА). Моллюски были собраны со скалистого дна вблизи побережья Англии в районе города Плимут (*Plymouth*). В опытах в результате фильтрации воды моллюски извлекали из нее клетки водоросли *Isochrysis galbana*. Снижение концентрации суспендированных в воде клеток регистрировали с помощью счетчика Култера. Эксперименты проводили в термостатируемой комнате при 16 °С. В опытах использовали моллюсков, стандартизированных по весу. В опытах по изучению действия ТДТМА сырая масса моллюсков составляла около 4 – 5 г (с раковинами), размер 30-35 мм. В опытах по изучению действия тяжелых металлов на фильтрацию воды черноморскими моллюсками *Mytilus galloprovincialis* использовали методику, описанную в [5, 10]. Расчет величины ВЭИ (воздействие на эффективность изъятия взвеси моллюсками) проводили как описано в [5].

Результаты и их обсуждение

Полученные в опытах результаты свидетельствуют о нарушении фильтрационной активности моллюсков при воздействии органических и неорганических загрязняющих веществ (поллютантов, ксенобиотиков) (табл. 1, 2).

Эти результаты целесообразно обсудить в связи с процессами самоочищения водных экосистем [7 – 10]. Процессы самоочищения включают в себя три группы процессов: физические, химические и биотические [5, 9]. В данном сообщении мы ограничимся рассмотрением биотических процессов, которые в своей совокупности интерпретируются как экологическая репарация – восстановление качества воды [10]. Угроза нарушению качества воды (что вызовет разрушение местобитаний и серьезное ухудшение условий обитания гидробионтов, вплоть до исчезновения видов) происходит с двух сторон.

Такую угрозу создают две группы факторов: во-первых, антропогенные факторы; во-вторых, многие естественные процессы, включая накопление и отмирание биомассы фитопланктона, поступление в воду биогенов с окружающей территории и из донных осадков и т.д. [3]. В водных экосистемах идут процессы ухудшения качества воды (поступление аутохтонного и аллохтонного органического вещества, биогенов, взвесей), что делает важными гидробиологические процессы экологической репарации, ведущие к восстановлению качества воды [1 – 5, 10].

Процессы самоочищения, движимые гидробионтами, уязвимы для повреждающих воздействий загрязняющих веществ [7]. Среди таких процессов – фильтрация воды гидробионтами [5]. Ее изучению посвящены наши исследования, которые привели к новым элементам в видении проблемы эвтрофирования [9] и роли биоразнообразия в формировании качества воды [10]. К ранее полученным результатам добавляются новые факты о действии катионного ПАВ ТДТМА на моллюсков (*Mytilus edulis* × *M. galloprovincialis*, природная гибридная популяция) (табл. 1), а также о действии тяжелых металлов на *M. galloprovincialis* (табл. 2).

Суммирование ряда последних экспериментов автора проведено в табл. 2, где для различных веществ приведен показатель, обоб-

Таблица 1

Снижение фильтрационной активности атлантических мидий из природной популяции *Mytilus edulis* × *M. galloprovincialis* при воздействии ПАВ тетрадецилтриметиламмонийбромида (ТДТМА). T_0 – начальный момент эксперимента; T_1 – момент времени через 50 мин после начала опыта; T_2 – момент времени через 100 мин после начала опыта

Концентрация ТДТМА, мг/л	Период времени (каждый период длился 50 мин)	Скорость фильтрации воды, в процентах от контроля (в контроле ТДТМА отсутствовал)
0,05	T_0-T_1	64,5
0,05	T_1-T_2	85,0
0,1	T_0-T_1	47,8
0,1	T_1-T_2	48,3
0,3	T_0-T_1	39,8
0,3	T_1-T_2	49,9
1	T_0-T_1	9,7
1	T_1-T_2	8,2
5	T_0-T_1	3,8
5	T_1-T_2	2,2

Примечание: в экспериментах участвовал Prof. J. Widdows.

Таблица 2

Химические вещества, в том числе ксенобиотики и поллютанты, которые проявили способность ингибировать процесс изъятия взвешенного вещества из воды гидробионтами-фильтраторами (новые результаты автора, а также по материалам [5 – 10, 25, 28])

№	Вещество	Организм	Концентрация, мг/л	Примечание или ссылка
1	сульфат кадмия	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	0,5	новые результаты автора
2	сульфат меди	<i>M. galloprovincialis</i>	2	новые результаты автора
3	нитрат свинца	<i>M. galloprovincialis</i>	20	новые результаты автора
4	бихромат калия	<i>M. galloprovincialis</i>	0,05	ВЭИ 268%
5	ТДТМА	<i>M. edulis</i> × <i>M. galloprovincialis</i>	0,05-5	новые результаты см. табл. 1
6	ТДТМА	<i>Crassostrea gigas</i>	0,5	ВЭИ 761 %
7	ДСН	<i>M. edulis</i> , <i>M. galloprovincialis</i>	более 1	[5]
8	ДСН	<i>Crassostrea gigas</i>	0,5	ВЭИ 231 %
9	Тритон X-100	<i>Unio tumidus</i>	5	[5]
10	Тритон X-100	<i>M. edulis</i>	1 и более	[5]
11	СМС1 (ОМО)	<i>Unio tumidus</i>	50	ВЭИ 187 %
12	СМС2 (Tide)	<i>M. galloprovincialis</i>	50	ВЭИ 207 %
13	СМС3 (Лоск)	<i>M. galloprovincialis</i>	7	ВЭИ 551 %
14	СМС4 (IXI)	<i>M. galloprovincialis</i>	10	ВЭИ 158 %
15	СМС4 (IXI)	<i>M. galloprovincialis</i>	50	ВЭИ 276 %
16	ЖМС1 (Е)	<i>M. galloprovincialis</i>	2	ВЭИ 214 %
17	ЖМС1 (Е)	<i>Crassostrea gigas</i>	2	ВЭИ 305 %
18	ЖМС2 (Fairy)	<i>C. gigas</i>	2	ВЭИ 1790 %

Примечание. Обычно указывается максимальная величина ВЭИ за весь период эксперимента. СМС – синтетическое моющее средство; ЖМС – жидкое моющее средство; ДСН – додецилсульфат натрия.

щающий данные экспериментов, так называемый индекс ВЭИ (воздействие на эффективность изъятия частиц из воды при ее фильтрации гидробионтами). Чем выше численное значение ВЭИ, тем сильнее воздействие данного загрязняющего вещества на изъятие взвешенного вещества из воды в результате ее фильтрации. В таблице численное значение ВЭИ превышает 100%, что указывает на ингибирование фильтрации воды и изъятия взвеси при действии всех изученных веществ. Наши новые данные хорошо согласуются с примерами сходного действия на фильтраторов других загрязняющих веществ, в том числе пестицидов (например, P. Dopkin и соавторы, 1997 – цит. по [5]). Недавно нами были получены новые экспериментальные результаты, указывающие на некоторую степень ингибирования фильтрационной активности морских мидий под воздействием и других химических веществ

таких, как наночастицы металла (Au) и суспензии нефти.

Новые данные подтверждают, что процессы, участвующие в экологической репарации, могут быть чувствительны к таким внешним факторам, как загрязнение водной среды химическими веществами. Высокая потенциальная лабильность и уязвимость экологической репарации заставляет с максимально бережным вниманием относиться к ней как предпосылке поддержания биологических процессов на надорганизменном уровне организации жизни. Сказанное выше перекликается с поисками подходов для анализа проблем стабильности и устойчивости экосистем [11, 15]. Новые подходы к определению этих свойств экосистем были предложены в [11]. Представляет интерес поиск элементов общего в особенностях процессов репарации на разных уровнях организации жизни – например, на надорганизменном уровне

Таблица 3

Некоторые особенности репарации на различных уровнях

Сравниваемые особенности	Экологическая репарация	Репарация ДНК
Причины необходимости в репарации как существенной функциональной активности живых организмов	В водных объектах имеют место процессы, ведущие к снижению качества воды в силу природных явлений и антропогенных факторов [28]	В организмах имеет место возникновение разрывов и других повреждений ДНК
Возрастание роли репарации в биосфере в условиях антропогенных воздействий	Нарастает агрессивность антропогенного фактора при загрязнении водоемов и водотоков [28]	Нарастает концентрация мутагенов в окружающей среде
Уязвимость процессов репарации к ксенобиотикам	Ксенобиотики могут снижать эффективность экологической репарации [16 – 28] (новые факты приводятся в <i>табл. 1</i> и <i>2</i>)	Ксенобиотики могут снижать эффективность репарации ДНК
Роль регуляции процессов репарации; оптимизация их скорости	Скорости изъятия взвешенных и растворенных веществ из воды, разрушения и сорбции веществ соответствуют скоростям других процессов в экосистеме; они подвержены регуляции [28]	Скорости процессов репарации отрегулированы; от них зависит скорость наблюдаемого в популяциях мутагенеза и, соответственно, наблюдаемая гетерогенность популяций, служащая важной предпосылкой микроэволюционного процесса
Связь репарации с процессами изменения энтропии [16]	Репарация противодействует процессу нарастания энтропии (при изменении концентрации веществ, растворенных в воде водоемов и водотоков)	Репарация противодействует процессу нарастания энтропии (при изменении упорядоченной структуры полимерных молекул ДНК)

и суборганизменном уровне (молекулярно-генетическом) (*табл. 3*).

В *табл. 3* сопоставлены некоторые особенности, общие для процессов репарации в обоих случаях. По-видимому, эти процессы – одно из условий поддержания важных характеристик организации жизни на соответствующих уровнях и одно из условий самого сохранения этих уровней организации жизни. Отмечалось, что организованность жизни, ее поддержание во времени, противостояние процессу нарастания нарушений организованности – существенные черты феномена жизни в биосфере Земли [11 – 14, 16].

Общим элементом упомянутых выше репарационных явлений, по-видимому, может являться активное противостояние нарастанию нарушений организованности в соответствующих «зонах ответственности» этих процессов репарации. Поддержание качества воды означает антиэнтропийное противостояние выравниванию концентрационных градиентов, существующих в водных экосистемах [16]. Репарация ДНК, как и экологическая репарация, также носит антиэнтропийный характер. Интересно, что в обоих случаях репарация проводится с эффективностью менее 100 %. В экосистемах при восстановлении качества воды последняя очищается от загрязнителей, растворенного

органического вещества (РОВ) и взвесей, но не полностью: в природной воде поддерживается некоторое содержание РОВ (в среднем 0,5-10 мг/л), а также некоторое содержание взвешенного вещества [3].

Обсуждаемый в данной статье материал имеет отношение к ряду концептуально существенных вопросов экологии, в том числе и к сложным вопросам устойчивого функционирования экологических систем и их места в формировании геохимической среды. Анализ важных аспектов функционирования пресноводных экологических систем и теория соответствующих вопросов даны в работе [11].

Заключение

Итак, наша экспериментальная работа выявила новые факты того, что процессы экологической репарации (на примере изъятия взвешенных частиц благодаря фильтрационной активности моллюсков) могут ингибироваться под воздействием загрязняющих веществ (ксенобиотиков) (*табл. 1, 2*). Аналогичное явление может наблюдаться в случае репарации ДНК, эффективность которой также может нарушаться при воздействии ксенобиотиков (*табл. 3*). Из сказанного выше вытекает, что

осуществляемая сообществом гидробионтов экологическая репарация (биотическое самоочищение воды) в водных экосистемах несет функцию, в некоторой степени аналогичную репарации ДНК на молекулярно-генетическом уровне организации жизни. В результате выявляется и характеризуется определенная сторона опасности антропогенного загрязнения, вызывающего нарушение репарационных процессов на различных уровнях организации жизни.

Выявление и сравнительный анализ тех или иных свойств или явлений жизни, общих для нескольких уровней ее организации, представляется целесообразным для дальнейшего уточнения концепций общей экологии [15].

Процессы самоочищения воды и связанной с этим экологической репарации включают в себя большое количество этапов и процессов и могут служить примером процессов, в сумме составляющих то, что названо «интегральным метаболизмом» [28] в водных экосистемах.

Представления об экологической репарации были прокомментированы в [16] и вписываются в теорию биотического самоочищения воды и улучшения ее качества, которая освещена в публикациях [17 – 28] и поддержана многими специалистами [29 – 35].

Автор благодарит сотрудников МГУ, а также Л.М. Сущенко, И.А. Захарова, Г.С. Розенберга, В.В. Малахова, Е.А. Криксунова и других коллег за обсуждение некоторых затронутых вопросов и замечания. Часть работы была поддержана MacArthur Foundation и Институтом открытого общества.

Литература

1. А. Ф. Алимов, Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков, Л., Наука, 1981, 248 с.
2. Л.М. Сущенко, Количественные закономерности питания ракообразных, Минск, Наука и техника, 1975, 208 с.
3. R. Wetzel, Limnology, 3rd edition, San Diego et al., Academic Press, 2001, 1006 p.
4. R.F. Dame, Ecology of Marine Bivalves: an Ecosystem Approach. Boca Raton, CRC Press, 1996, 277 p.
5. Остроумов С.А. Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы, М., МАКС-Пресс, 2001, 334 с.
6. Остроумов С.А. Водная экосистема: крупно-размерный диверсифицированный биореактор с функцией самоочищения воды. ДАН (Доклады РАН), 2000, Т. 374, № 3, С. 427 – 429.

Ключевые слова:

качество воды,
поллютанты,
ксенобиотики,
репарация,
поверхностно-активные вещества (ПАВ),
детергенты,
металлы,
тетрадецилтриметил-аммонийбромид,
морские мидии,
Mytilus edulis,
Mytilus galloprovincialis

7. Остроумов С.А. Концепция водной биоты как лабильного и уязвимого звена системы самоочищения воды. ДАН, 2000, Т. 372, № 2, С. 279 – 282.
8. Остроумов С.А. Ингибиторный анализ регуляторных взаимодействий в трофических сетях. ДАН, 2000, Т. 375, № 6, С. 847 – 849.
9. Остроумов С.А. Синэкологические основы решения проблемы эвтрофирования ДАН, 2001, Т. 381, № 5, С. 709 – 712.
10. Остроумов С.А. Сохранение биоразнообразия и качество воды: роль обратных связей в экосистемах // ДАН, 2002, Т. 382, № 1, С. 138 – 141.
11. А. Ф. Алимов, Элементы теории функционирования водных экосистем, Санкт-Петербург, Наука, 2000, 147 с.
12. Э. Шредингер (E.Schrödinger), Что такое жизнь с точки зрения физики. М., ИЛ, 1947, 146 с.
13. О.Г. Газенко, В.Б. Малкин, Космическая биология. В кн.: История биологии (с начала XX века до наших дней), М., Наука, 1975, С. 560 – 578.
14. Э.М. Галимов, Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. происхождение и принципы эволюции, М., Едиториал УРСС, 2001. 256 с.
15. Г.С. Розенберг, Д.П. Мозговой, Д.Б. Гелашвили, Экология: элементы теоретических конструкций современной экологии, Самара, Самарский научный центр РАН, 1999, 396 с.
16. Остроумов С.А. О биотическом очищении воды и экологической репарации. // Сиб. экол. журнал. 2006. № 3. С. 339 – 343.
17. Ostroumov S.A. Inhibitory analysis of top-down control: new keys to studying eutrophication, algal blooms, and water self-purification. Hydrobiologia. 2002. 469, P. 117 – 129.
18. Ostroumov S.A. Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks. Hydrobiologia. 2002. V. 469 (1-3)P. 203 – 204.
19. Ostroumov S.A. Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions // Rivista di Biologia / Biology Forum. 2004. V. 97. P. 39 – 50.
20. Остроумов С.А. О биотическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории // ДАН. 2004. Т.396. № 1. С. 136 – 141.
21. Остроумов С.А. Биологический механизм самоочищения в природных водоемах и водотоках: теория и практика // Успехи современной биологии. 2004. Т.124. №5. С. 429 – 442.
22. Остроумов С.А. Роль биотических факторов в формировании качества воды и самоочищении водных экосистем // Экологическая химия. 2004. Т. 13(3) С. 186 – 194.

Some aspects of water filtering activity of filter-feeders // *Hydrobiologia*. 2005. Vol. 542, No. 1. P. 275 – 286.

23. Остроумов С.А. О некоторых вопросах поддержания качества воды и ее самоочищения // *Водные ресурсы*. 2005. Т.32. № 3. С. 337 – 347.

24. Остроумов С.А. О полифункциональной роли биоты в самоочищении водных экосистем // *Экология*. 2005. № 6. С. 452 – 459.

25. Ostroumov S.A. Biological Effects of Surfactants. CRC Press. Taylor & Francis. Boca Raton, London, New York. 2006. 279 p.

26. Ostroumov S.A. Biomachinery for maintaining water quality and natural water self-purification in marine and estuarine systems: elements of a qualitative theory // *International Journal of Oceans and Oceanography*. 2006. Volume 1, №.1. P. 111 – 118.

27. Остроумов С.А. Элементы теории биоконтроля качества воды: фактор экологической безопасности источников водоснабжения // *Химическая и биологическая безопасность*. 2008. № 5-6. С. 36 – 39.

28. Остроумов. С.А. Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов. М.: МАКС-Пресс. 2008, 200 с.

29. Ермаков В.В. О книге С.А.Остроумова «Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов» // *Вода: химия и экология*. 2009. №8. С. 25 – 29.

30. Brooks, B.W., Riley, T.M., Taylor, R.D. Water quality of effluent-dominated ecosystems: Ecotoxicological, hydrological, and management considerations // *Hydrobiologia*. 2006. 556 (1), P. 365 – 379.

31. Fisenko A.I. A New Long-Term On Site Clean-Up Approach Applied to Non-Point Sources of Pollution // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2004, V. 156, № 1-4. P. 1-27.

32. Neofitou, C., Dimitriadis, A., Pantazis, P., Psilovikos, A., Neofitou, N., Paleokostas, A. Self-purification of a long-stretched gully affects the restoration of an alpine-type lake in northern Greece // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2005. 14 (12 A), P. 1141 – 1149.

33. Stabili, L., Licciano, M., Giangrande, A., Longo, C., Mercurio, M., Marzano, C.N. Corriero Filtering activity of *Spongia officinalis* var. *adriatica* (Schmidt) (Porifera, Demospongiae) on bacterioplankton: Implications for bioremediation of polluted seawater // *Water Research* 2006, 40 (16), P. 3083 – 3090.

34. Добровольский Г.В., Розенберг Г.С., Тодераш И.К. (ред.) Открытие нового вида опасных антропогенных воздействий в экологии животных и биосфере: ингибирование фильтрационной активности моллюсков поверхностно-активными веществами. М.: МАКС-Пресс. 2008. 104 с.

35. Wang X., Y. An, J. Zhang, X. Shi, C. Zhu, R. Li, M. Zhu and S. Chen. Contribution of biological processes to self-purification of water with respect to petroleum hydrocarbon associated with No. 0 diesel in Changjiang Estuary and Jiaozhou Bay, China // *Hydrobiologia*, 2002. V. 469, Numbers 1-3, P. 179 – 191.



S.A. Ostroumov

RELATIONSHIP BETWEEN WATER SELF-PURIFICATION AND ENVIRONMENTAL REPAIR PROCESSES

The experimental results were obtained to demonstrate that one of the most important ecological rehabilitation processes (that of improving water quality under removal of suspension from water by hydrobionts) is inhibited by pollutant (xenobiotic). This suggests an analogy between repair processes at genetic level which can also suffer from

xenobiotics effects revealing properties similar to ecological rehabilitation. Xenobiotics causing adverse effects on ecological improving water quality comprise numerous surface-active agents (surfactants), detergents, heavy metals, etc. The experimental data is provided on effects of tetradecyltrimethylammonium on

filtration activity of natural hybrid mussel population of *Mytilus edulis* × *M. galloprovincialis*.

Key words: water quality, pollutants, xenobiotics, rehabilitation, surface-active agents (surfactants), detergents, metals, tetradecyltrimethylammonium, sea mussels, *Mytilus edulis*, *Mytilus galloprovincialis*

