

# ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Самарская Лука. 2008. – Т. 17, № 4(26). – С. 708-717

© 2008 С.А.Остроумов\*

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РЕПАРАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАРУШЕНИЙ В СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЗНИ: ПОИСК ЭЛЕМЕНТОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО СХОДСТВА

В работе получены новые экспериментальные результаты, доказывающие, что один из важнейших процессов экологической репарации качества воды (процесс изъятия гидробионтами взвеси из воды) ингибируется загрязняющим веществом (ксенобиотиком); это указывает на элемент сходства с процессами репарации ДНК, которые также могут нарушаться ксенобиотиками и характеризуются некоторыми другими свойствами (снижение энтропии и др.), аналогичными особенностям экологической репарации. Ксенобиотики, оказывающие негативное воздействие на процессы, важные для экологической репарации качества воды, включали различные поверхностно-активные вещества, детергенты, тяжелые металлы и др. Впервые приводятся новые экспериментальные данные о воздействии тетрадецилтриметилам-монийбромида на морские моллюски (мидии).

### Ostroumov S.A. ECOLOGICAL REPARATION And RESTORATION of INFRINGEMENTS In SYSTEMS of VARIOUS LEVELS of ORGANIZATION of LIFE: SEARCH of ELEMENTS of FUNDAMENTAL SIMILARITY

New experimental data were obtained that show that one of the most important processes of ecological repair of water quality (the process of removal of suspended matter by aquatic organisms) is inhibited by a pollutant (a xenobiotic), which points to some similarity or analogy with the processes of DNA repair; the latter can also be inhibited by some xenobiotics and have some other attributes (a decrease in entropy etc.) that are analogous to those of ecological repair. The xenobiotics that produced those negative effects on the processes of the ecological repair of water quality included various surfactants, detergents, and metals. New experimental data on the effects of tetradecyltrimethyl ammonium bromide on marine mussels are presented.

Для восстановления загрязненных водных экосистем используют методы биоремедиации (лат. *mederi* – лечить, врачевать) и фиторемедиации,

---

\* Московский государственный университет, г. Москва

которые основаны на применении микроорганизмов и растений в качестве агентов и факторов, способствующих очищению среды (Остроумов, 2001). В природных водных экосистемах идут процессы, важные для самоочищения (Алимов 1981; Сущеня 1975; Остроумов 2000а,б; Dame 1996; Wetzel, 1983), благодаря которым система поддерживает качество воды и восстанавливает его в случае не слишком больших отклонений от нормального состояния. Биологические процессы самоочищения являются природной биоремедиацией экосистемы. На экосистемном уровне организации жизни постоянно происходят процессы ремедиации, восстановления и в широком смысле слова экологической репарации ("ремонта") системы, что порождает целесообразность поиска аналогий при сопоставлении этих процессов с процессам репарации на другом (молекулярно-генетическом) уровне организации жизни – процессам репарации ДНК. Одним из оснований для такого поиска служит стремление к отысканию фундаментальных свойств жизни, проявляющихся на различных уровнях ее организации. Продолжая такой поиск, целесообразно еще раз вернуться к анализу феномена самоочищения воды - комплекса процессов, включающего физические, химические и биологические составляющие (Остроумов, 2000а,б,в,г,д), в том числе фильтрацию воды гидробионтами. Целесообразно продолжить изучение чувствительности системы самоочищения к антропогенному воздействию (Остроумов, 2000б).

Цель данного сообщения – сообщить о результатах новых опытов по воздействию ксенобиотиков на фильтрацию воды и, используя новые данные экспериментов (с применением предложенного нами ингибиторного анализа экологических явлений [Остроумов, 2000в] и литературы, проанализировать некоторые особенности экологической репарации (деятельности биотического блока системы самоочищения) на примере процесса изъятия из воды взвеси при фильтрации воды моллюсками.

В данной работе получены новые результаты, доказывающие, что один из важнейших процессов экологической репарации качества воды (процесс изъятия гидробионтами взвеси из воды) ингибируется загрязняющими веществами (ксенобиотиками); это дополнительно указывает на элемент сходства с процессами репарации ДНК, которые также могут нарушаться ксенобиотиками и характеризуются некоторыми другими свойствами, аналогичными особенностям экологической репарации.

Методика работы. Экспериментальные исследования фильтрационной активности моллюсков проводили в основном по методике, описанной в (Остроумов, 2000д, 2001а).

Изучали скорость фильтрации воды моллюсками из природной гибридной популяции *Mytilus edulis* x *M. galloprovincialis* при воздействии катионного поверхностно-активного вещества (ПАВ) тетрадецилтримети-

ламмоний бромида (ТДТМА). Ранее действие этого вещества исследовали на других видах гидробионтов-фильтраторов (Остроумов, 2000д, 2001а). Моллюски были собраны со дна вблизи южного побережья Англии в районе города Плимут (Plymouth). В проведенных опытах в результате фильтрации воды моллюски извлекали из нее клетки водоросли *Isochrysis galbana*. Снижение концентрации суспендированных в воде клеток регистрировали с помощью счетчика Култера. Температура поддерживалась при 16°C благодаря проведению экспериментов в термостатируемой комнате. В опытах использовали моллюсков, стандартизированных по весу. В опытах по изучению действия ТДТМА сырая масса индивидуумов, за редким исключением, составляла обычно 3.6-5.9 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 (Остроумов, 2000д, 2002). Расчет величины ВЭИ (воздействие на эффективность изъятия взвеси моллюсками) проводили как описано в (Остроумов, 2000д, 2001а).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в опытах новые результаты свидетельствуют о нарушении фильтрационной активности моллюсков при воздействии органических и неорганических загрязняющих веществ (поллютантов, ксенобиотиков) (табл. 1 и 2). Эти результаты целесообразно обсудить в связи с процессами самоочищения водных экосистем (Остроумов, 2000г,д, 2001, 2002). Процессы самоочищения включают в себя три группы процессов: физические, химические и биологические (Остроумов, 2000г,д, 2001). В данном сообщении мы ограничимся рассмотрением биологических процессов, которые в своей совокупности интерпретируются как экологическая репарация – восстановление качества воды. Угроза нарушению качеству воды (что вызовет разрушение местообитаний и серьезное ухудшение условий обитания гидробионтов, вплоть до исчезновения видов) проистекает 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.

Сосуществование и одновременное протекание процессов ухудшения качества воды и процессов экологической репарации, направленных на восстановление качества воды, проиллюстрировано в табл. 3 (левая и средняя колонки).

Ранее был подчеркнут и анализировался тот факт, что биологические процессы самоочищения, движимые гидробионтами, высокоуязвимы для повреждающих воздействий загрязняющих веществ (Остроумов, 2000б).

Поэтому в табл. 3 указаны также опасности нарушения процессов экологической репарации, которые могут возникнуть при нарушении тех биотических звеньев экосистемы, которые ответственны за конкретные процессы (табл. 3, правая колонка).

Среди пунктов в правой колонке табл. 3 – опасность нарушения фильтрации воды. Ее изучению посвящены наши исследования, которые привели к новым подходам к решению проблемы эвтрофирования (Остроумов 2000д) и к углублению понимания роли биоразнообразия в формировании качества воды (Остроумов, 2002). В данной работе к ранее полученным результатам добавляются новые факты о действии катионного ПАВ ТДТМА на моллюсков (*Mytilus edulis* x *M. galloprovincialis*, природные популяции) (см. табл. 1), а также о действии тяжелых металлов (см. табл. 2).

Таблица 1

**Снижение фильтрационной активности атлантических мидий *Mytilus edulis* x *M. galloprovincialis* (из природной гибридной популяции) при воздействии тетрадецилтриметиламмонийбромида (ТДТМА)**

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 <sub>0</sub> -T <sub>1</sub>	64.47
0.05	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	84.98
0.1	T <sub>0</sub> -T <sub>1</sub>	47.84
0.1	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	48.28
0.3	T <sub>0</sub> -T <sub>1</sub>	39.82
0.3	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	49.92
1	T <sub>0</sub> -T <sub>1</sub>	9.74
1	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	8.21
5	T <sub>0</sub> -T <sub>1</sub>	3.84
5	T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	2.20

Примечание. T<sub>0</sub> - начальный момент эксперимента; T<sub>1</sub> – момент времени через 50 минут после начала опыта; T<sub>2</sub> – момент времени еще на 50 мин позже. В экспериментах участвовал Prof. J. Widdows.

Суммирование ряда последних экспериментов автора проведено в табл. 3, где для различных загрязняющих веществ приведен показатель, обобщающий 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. Во всех строках таблицы численное значение ВЭИ превышает 100%, что указывает на ингибирование фильтрации воды и изъятия взвесей при действии всех изученных веществ. Наши новые данные хорошо согласуются с ранее известными примерами сходно-

го действия на бентосных и планктонных фильтраторов других загрязняющих веществ (Остроумов, 2000д), в том числе пестицидов (напр., P. Donkin и соавторы (цит. по:Остроумов, 2000,г,д).

Таблица 2

**Действие различных поллютантов на изъятие взвешенного вещества из воды гидробионтами – фильтраторами (новые результаты автора, а также по материалам (Остроумов, 2000а,б,в,г, 2001, 2002)**

№	Вещество	Организм	Концентрация, мг/л	Примечание
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	СМС1 (ОМО)	<i>Unio tumidus</i>	50	ВЭИ 187%
6	СМС2 (Tide)	<i>M. galloprovincialis</i>	50	ВЭИ 207%
7	СМС3 (Лоск)	<i>M. galloprovincialis</i>	7	ВЭИ 551 %
8	СМС4 (IXI)	<i>M. galloprovincialis</i>	10	ВЭИ 158 %
9	СМС4 (IXI)	<i>M. galloprovincialis</i>	50	ВЭИ 276 %
10	ЖМС1 (Е)	<i>M. galloprovincialis</i>	2	ВЭИ 214 %
11	ЖМС1 (Е)	<i>Crassostrea gigas</i>	2	ВЭИ 305 %
12	ЖМС2 (Fairy)	<i>Crassostrea gigas</i>	2	ВЭИ 1790 %
13	ДСН	несколько видов	1 и выше	см.: Биологические эффекты, 1991; <i>Остроумов С.А</i> 2000д.
14	Тритон X-100	несколько видов	1 и выше	см.: Биологические эффекты, 1991; <i>Остроумов С.А</i> 2000д.
15	ТДТМА	несколько видов	0.05 и выше	см. табл. 1 и см.: Биологические эффекты, 1991; <i>Остроумов С.А</i> 2000д.

Примечание: величина ВЭИ (воздействие на эффективность изъятия взвеси) рассчитана как описано в (Алимов, 1981; Сушеня, 1975; Остроумов, 2000а,б,в,г,д; Wetzel, 1983; Dame, 1996). Обычно указывается максимальная величина ВЭИ за весь период эксперимента. СМС - синтетическое моющее средство; ЖМС - жидкое моющее средство; ДСН-додецилсульфат натрия

**Некоторые процессы нарушения качества воды  
и противодействующие им природные процессы, которые входят в  
систему экологической репарации (многие процессы взаимосвязаны и  
накладываются друг на друга). ЗВ – загрязняющие вещества  
(на основе работ Остроумов 2000а, б,в, г,д, 2001, 2002; Wetzel, 1983)**

Процессы нарушения качества воды	Процессы экологической репарации, способствующие восстановлению нарушенного качества воды	Потенциально возможные нарушения экологической репарации при антропогенных воздействиях
Поступление в воду ЗВ и биогенов (соединений, содержащих N,P)	Сорбция и накопление гидробионтами ЗВ и биогенов	Снижение биомассы организмов, сорбирующих и накапливающих вещества
Поступление в воду органических и неорганических веществ	Биотрансформация: редокс-реакции, разрушение, конъюгация	Снижение скорости биотрансформации в результате снижения биомассы и активности, изменения видового состава гидробионтов
Поступление в воду органических и неорганических веществ	Внеклеточная ферментативная трансформация растворенных веществ	Снижение выделения внеклеточных ферментов
Поступление в воду взвешенных частиц органической и минеральной природы	Удаление взвешенных частиц из столба воды в результате фильтрации воды гидробионтами	Снижение фильтрационной активности гидробионтов
Поступление в воду загрязняющих веществ	Удаление ЗВ из столба воды в результате сорбции пеллетами	Снижение образования пеллет
Выход биогенов и ЗВ из донных осадков в воду	Предотвращение или замедление выхода биогенов и ЗВ из донных осадков в воду в результате перехвата и накопления их организмами бентоса	Снижение биомассы бентоса, изменение состава сообществ
Снижение концентрации кислорода в воде при его поглощении в ходе химических и биохимических реакций	Выделение кислорода в воду в результате фотосинтеза цианобактерий, водорослей и высших водных растений	Снижение фотосинтетической активности автотрофных гидробионтов

Примечание. Таблица носит иллюстративный характер и не претендует на полноту перечисления основных процессов.

**Сравнение некоторых особенностей экологической  
репарации и репарации ДНК**

Сравнимые особенности	Экологическая репарация	Репарация ДНК
Причины необходимости в репарации как постоянной функциональной активности	Имеют место процессы, ведущие к снижению качества воды в силу природных явлений и антропогенных факторов (Wetzel, 1983)	Имеют место постоянно возникающие разрывы и другие повреждения ДНК
Возрастание роли репарации в условиях антропогенных воздействий	Нарастает агрессивность антропогенного фактора при загрязнении водоемов и поступлении биогенов (Остроумов, 2000г,д, 2001)	Нарастает концентрация мутагенов в окружающей среде
Уязвимость к ксенобиотикам	Ксенобиотики могут снижать эффективность экологической репарации (Остроумов, 2001, 200а,б,в, г,д) новые факты приводятся в табл. 1 и 2)	Ксенобиотики могут снижать эффективность репарации
Роль регуляции процессов; оптимизация их скорости	Скорости изъятия взвешенных и растворенных веществ из воды, разрушения и сорбции веществ должны соответствовать скорости других процессов в экосистеме и не превышать оптимальные уровни (Остроумов 2000б, в, 2001, 2002)	Процессы репарации должны быть тщательно сбалансированы, поскольку от них зависит скорость наблюдаемого в популяциях мутагенеза и соответственно наблюдаемая гетерогенность популяций, служащая важной предпосылкой микроэволюционного процесса
Связь репарации с процессами изменения энтропии (Галимов, 2001)	Противодействие процессу нарастания энтропии (при изменении концентрации веществ, растворенных в воде водоемов). Примеры – поглощение гидробионтами растворенных органических веществ и биогенов ((Wetzel, 1983)	Противодействие процессу нарастания энтропии (при изменении упорядоченной структуры полимерных молекул ДНК)

Таким образом, новые данные подтверждают, что процессы, участвующие в экологической репарации, могут быть высокочувствительны к таким внешним факторам, как загрязнение водной среды химическими веществами. Высокая потенциальная лабильность и уязвимость экологической репарации заставляет с максимально бережным вниманием относить-

ся к ней как предпосылке поддержания биологических процессов на надорганизменном уровне организации жизни.

Необходимо отметить, что сказанное выше перекликается с поисками подходов для анализа проблем стабильности и устойчивости экосистем.

Новые подходы к определению и количественной характеристике этих свойств экосистем были предложены А.Ф. Алимовым (2000).

Интересно, что важность и необходимость существования репарационных процессов выявляется как общий элемент, свойственный разным уровням организации живых систем.

Представляет интерес ответ на вопрос о том, имеется ли что-либо общее в особенностях процессов репарации на разных уровнях организации жизни. Поэтому полезно сравнить эти процессы на двух уровнях организации жизни – например, на надорганизменном уровне и суборганизменном уровне (молекулярно-генетическом), см. табл. 4.

Табл. 4 сопоставляет некоторые общие или аналогичные особенности, связанные с протеканием процессов репарации в обоих случаях. Непрерывное протекание процессов репарации – по-видимому, 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 энтропии – важнейшие черты феномена жизни в биосфере Земли (Шредингер, 1947; Газенко, Малкин, 1975; Галимов, 2001).

Общим элементом упомянутых выше репарационных явлений, по-видимому, является активное противостояние нарастанию энтропии в соответствующих "зонах ответственности" этих процессов репарации. Поддержание качества воды означает антиэнтропийное противостояние выравниванию концентрационных градиентов, существующих в водных экосистемах. Репарация ДНК, как и экологическая репарация, также носит антиэнтропийный характер.

Итак, данная работа выявила новые факты того, что процессы экологической репарации (на примере изъятия взвешенных частиц благодаря фильтрационной активности моллюсков) ингибируются под воздействием загрязняющих веществ (ксенобиотиков) (табл. 1 и 2). Аналогичное явление может наблюдаться в случае репарации ДНК, эффективность которой также может нарушаться при воздействии ксенобиотиков.

Представляется возможным предположить, что дальнейший сравнительный анализ процессов репарации на разных уровнях организации жизни, начатый в данном сообщении, будет углубляться и окажется полезным для понимания некоторых сторон сущности жизни. Выявление тех или иных свойств или явлений жизни, общих для нескольких уровней ее орга-



низации, может оказаться полезным также при продолжении попыток найти подходы для выявления фундаментальных особенностей и признаков жизни в связи с обсуждением проблем экзобиологии (например, см. Газенко, Малкин, 1975), при анализе путей эволюции живых существ (Галимов, 2001) и теоретических конструкций современной экологии (Розенберг, Мозговой, Гелашвили, 1999). Результаты настоящей работы согласуются с данными недавней публикации (Остроумов, 2002).

Новые факты и их анализ позволяют по-новому увидеть обобщение В.И. Вернадского о том, что в присутствии организмов "несомненным фактом является изменение всех химических равновесий в биосфере... причем общие законы равновесий не нарушаются..." (Вернадский, 2001, стр. 89).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В.Д. Федорова и других сотрудников кафедры гидробиологии, а также Т.И. Моисеенко, В.В. Малахова, Е.А. Криксунова, В.Н. Максимова и других коллег за обсуждение и критические замечания, J. Widdows, N. Walz, Н.Н. Колотилову, сотрудников ИНБЮМ НАНУ за помощь в работе. Благодарю Open Society Foundation (программа грантов для индивидуальных исследований) за поддержку.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Алимов А.Ф.** Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков. Л.: Наука, 1981. 248 с. - **Алимов А.Ф.** Элементы теории функционирования водных экосистем. Санкт-Петербург: Наука. 2000. 147 с.

**Вернадский В.И.** Биосфера. М.: Издательский дом "Ноосфера", 2001. – 243 с.

**Газенко О.Г., Малкин В.Б.** Космическая биология // История биологии (с начала XX века до наших дней). М.: Наука. 1975. С. 560-578. - **Галимов Э.М.** Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. происхождение и принципы эволюции. М.: Едиториал УРСС. 2001. 256 с.

**Остроумов С.А.** Ингибиторный анализ регуляторных взаимодействий в трофических цепях // ДАН. 2000а. Т. 375. № 6. С. 847-849. - **Остроумов С.А.** Биологические эффекты поверхностно-активных веществ в связи с антропогенными воздействиями на организмы. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. М.: МГУ, 2000б. - **Остроумов С.А.** Биологические эффекты поверхностно-активных веществ в связи с антропогенными воздействиями на биосферу, М.: МАКС-Пресс, 2000в. 116 с. - **Остроумов С.А.** Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы. М.: МАКС-Пресс. 2001г. 334 с. - **Остроумов С.А.** Водная экосистема: крупноразмерный диверсифицированный биореактор с функцией самоочищения воды // ДАН (Доклады РАН). 2000д. Т. 374. № 3. С. 427-429. - **Остроумов С.А.** Идентификация нового вида опасности химических веществ: ингибирование процессов экологической ремедиации // ДАН. 2002. т. 385. № 4. С.571-573. - **Остроумов С.А.** Концепция водной биоты как лабильного и уязвимого звена системы самоочищения воды // ДАН. 2000. Т. 372. № 2. С. 279-282. - **Остроумов С.А.** Синэкологические основы решения проблемы эвтрофирования // ДАН. 2001. Т. 381. № 5. С.

709-712. - **Остроумов С.А.** Сохранение биоразнообразия и качество воды: роль обратных связей в экосистемах // ДАН. 2002. Т. 382. № 1. С. 138-141.

**Розенберг Г.С., Мозговой Д.П., Гелашвили Д.Б.** Экология: элементы теоретических конструкций современной экологии. Самара: Самарский научный центр РАН. 1999. 396 с.

**Сушня Л.М.** Количественные закономерности питания ракообразных. Минск: Наука и техника, 1975. 208 с.

**Шредингер Э.** (Schrödinger E.) Что такое жизнь с точки зрения физики. М.: ИЛ, 1947.

**Dame R.F.** Ecology of Marine Bivalves: an Ecosystem Approach. Boca Raton: CRC Press, 1996. 277 p.

**Wetzel R.** Limnology. Fort Worth et al.: Saunders College Publishing, 1983. 858 p.

Поступила в редакцию  
21 марта 2006 г.