

CHAPTER 3

https://doi.org/10.18485/green_economy_4ir.2021.ch3

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ЗДОРОВЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: ТЕОРИЯ САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ

ECOLOGICAL THEORY OF IMPROVING WATER QUALITY IN HEALTHY AQUATIC ECOSYSTEMS: THEORY OF WATER SELF-PURIFICATION

S. A. Ostroumov - <https://orcid.org/0000-0002-5593-5044>¹

¹ Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia;

In the paper, fundamentals of the author's innovative theory of multifunctional role of the biota (biological community of living organisms) in water self-purification in aquatic ecosystems are formulated. The theory covers the following: (1) sources of energy for the mechanisms of self-purification; (2) the main functional blocks of the system of self-purification; (3) the list of the main processes that are involved; (4) analysis of the degree of participation of the main large taxa; (5) degree of reliability and the main mechanisms providing the reliability; (6) regulation of the processes. This theory covers both freshwater and marine ecosystems. The author identifies the following types of ecological mechanisms, which being taken together constitute a complex ecological mechanism of ecosystem self-purification of water, namely, these types of mechanisms similar to technological devices that act in relation to aquatic pollutants as (1) filters, (2) pumps, (3) mills, (4) sorbents. In this article, the author substantially supplemented the formulations of his theory of self-purification of water, the initial versions of which were presented in previous articles and books of the author. The areas of application of the proposed theory are indicated, which relate to the issues as important as economy, energy saving, reducing carbon dioxide emissions, the implementation of environmental legislation, environmental protection, conservation of biodiversity, as well as the environmental education.

1. ВВЕДЕНИЕ

Накопление знаний в области водной экологии и биологии (например, Алимов, 1981, Алимов, 2000; Сущеня, 1974) и наши экспериментальные работы (напр., Остроумов, 1986; Остроумов, 2000 а; Остроумов, 2000 б; Остроумов, 2000 в; Остроумов, 2001 а; Остроумов, 2001 б; Остроумов, 2002 а; Остроумов, 2002 б; Остроумов, 2002 в; Остроумов, 2003) привели к необходимости работать над созданием обобщающих положений о функционировании водных экосистем, в том числе в связи с нарастанием дефицита воды хорошего качества (хорошей степени чистоты) в источниках водоснабжения.

В этой главе сформулированы обобщающие положения, которые представляют собой предложенную автором инновационную теорию полифункциональной роли биоты (организмов) в самоочищении воды в водных экосистемах. Эта теория включает в себя положения, характеризующие следующее: (1) источники энергии механизмов самоочищения водных экосистем; (2) основные функциональные блоки системы процессов самоочищения; (3) основные процессы самоочищения водных экосистем; (4) степень вовлеченности в самоочищение основных крупных таксонов; (5) степень надежности системы и механизмы ее обеспечения; (6) саморегуляция биоты. Эта теория охватывает и пресноводные, и морские экосистемы. Автор выделяет следующие типы экологических механизмов, в совокупности составляющих комплексный экологический механизм экосистемного самоочищения воды, а именно механизмы, аналогичные технологическим устройствам, которые действуют по отношению к загрязняющим веществам как (1) фильтры, (2) насосы, (3) мельницы, (4) сорбенты. В данной статье автор существенно дополнил формулировки своей теории самоочищения воды, первоначальные варианты которой были изложены в предыдущих статьях и книгах автора. Указаны области применения предложенной теории, которые касаются экономики, энергосбережения, уменьшения выбросов двуоксида углерода, воплощения в жизнь экологического законодательства, охраны окружающей среды и биоразнообразия, а также природоохранного образования.

Термин “кондиционирование” обычно связывают с кондиционированием воздуха. Но можно говорить и о кондиционировании воды, т.е. о формировании ее полезных качеств. Анализ, проведенный в статье, позволяет более полно увидеть важнейшую роль водных организмов в сохранении водных объектов и источников водоснабжения и водных ресурсов в хорошем или, по крайней мере, удовлетворительном состоянии.

Водопользование и водоподготовка - это крупномасштабный циклы, включающий и технологические, и природные процессы. Начальные или предварительные стадии водоподготовки протекают в природных водных объектах - водоемах, водотоках и экосистемах, где идет формирование качества воды, используемой далее для питьевых, промышленных и иных целей.

Заключительные стадии водоочистки также происходят в природе, т.е. в тех водных объектах, куда сбрасываются использованные воды после прохождения ими той или иной степени очистки в специальных очистных сооружениях. Поэтому понимание природных механизмов формирования качества воды, ее очищения и кондиционирования имеет большое значение для оптимальной организации всего цикла водопользования в широком смысле слова.

Ранее нами был опубликован цикл статей и книг, которые сформулировали теорию биомеханизмов (biomachinery) самоочищения воды (water self-purification) (напр., Остроумов, 2004; Остроумов, 2008; Ostroumov, 2005; Ostroumov, 2009).

Цель этой публикации - кратко суммировать ряд этих и других публикаций автора на тему самоочищения воды. Эта работа написана на их основе, включая статью, опубликованную автором под названием “Кондиционирование воды в природе: как оно происходит?” в 2004 году.

2. ФЕНОМЕН САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ И МЕСТО БИОТЫ В НЕМ

Для формирования качества воды, ее очищения в водных экосистемах важны физические, химические и биотические процессы (Остроумов, 2000 а; Остроумов, 2004; Остроумов, 2008; Ostroumov, 2005). Как выявил наш анализ, проведенный в предыдущих работах автором, многие из физических и химических процессов регулируются биологическими факторами или в

определенной мере подвержены их воздействию. Например, масштабы сорбции загрязняющих веществ оседающими частицами взвесей зависят от концентрации клеток фитопланктона. Фотохимические процессы разрушения веществ протекают при условии прозрачности воды, а прозрачность обеспечивается фильтрационной активностью гидробионтов. Таким образом, биотические процессы и факторы находятся в центре всего механизма самоочищения воды.

В самоочищении водных экосистем и формировании качества воды участвуют микроорганизмы, фитопланктон, высшие растения, беспозвоночные животные, рыбы. Важно, что каждая из этих групп организмов вовлечена в несколько процессов системы самоочищения. Эти группы организмов равным образом важны для нормального протекания процессов самоочищения. Большие списки процессов самоочищения, систематизированные и разбитые на блоки, были составлены и опубликованы нами ранее (Остроумов, 2000 а; Остроумов, 2001 а; Остроумов, 2004; Остроумов, 2008; Ostroumov, 2005).

3. МЕХАНИЗМЫ САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ.

По мнению автора (Остроумов, 2004) , необходимо выделить три основных типа механизмов самоочищения водных экосистем, которые мы назвали следующим образом:

- (1) Фильтрационная активность, или фильтры (filters);
- (2) Механизмы переноса, перекачивания химических веществ из одной экологической среды в другую - кратко говоря, насосы (pumps);
- (3) Расщепление молекул загрязняющих веществ - кратко говоря, мельницы (mills) (Остроумов, 2004).

Эти три типа механизмов были выделены нами в предыдущих публикациях.

Сейчас мы считаем целесообразным добавить еще два типа механизмов, четвертый и пятый типы механизмов, а именно:

(4) Сорбция загрязняющих веществ на живых организмах. В результате происходит иммобилизация сорбированных молекул, атомов и ионов. Снижается проявление их токсичности для других организмов.

- (5) Сорбция загрязняющих веществ на субстратах, не

являющимися живыми организмами. Такие субстраты разнообразны и заслуживают дополнительного комментария.

На основе проведенного нами анализа (Остроумов, 2004) мы предлагаем выделять в составе первых трех типов механизмов следующие компоненты.

3.1 Фильтры

Механизмы фильтров - так мы называем большой комплекс процессов и факторов, который включает в себя следующее:

(а) совокупность беспозвоночных гидробионтов-фильтраторов (filter-feeders);

(б) сообщества высших водных растений (макрофитов, macrophytes), которые задерживают часть биогенов (азот, фосфор) и загрязняющих веществ, поступающих в экосистему с прилегающей территории;

(в) бентос, задерживающий и поглощающий часть биогенов (nutrients) и загрязняющих веществ (поллютантов, pollutants), мигрирующих на границе раздела вода/донные осадки;

(г) микроорганизмы, сорбированные на взвешенных частицах, перемещающихся относительно водной массы вследствие гравитационного оседания частиц под действием сил тяжести; в результате водная масса и микроорганизмы перемещаются относительно друг друга, что эквивалентно ситуации, когда вода профильтровывается через зернистый субстрат с прикрепленными (attached) микроорганизмами; последние извлекают из воды растворенные органические вещества и биогены (Остроумов, 2004).

3.2 Механизмы переноса (насосы)

В механизмы переноса (Остроумов, 2004) мы включаем следующее:

(а) функциональный насос, обеспечивающий перемещение части поллютантов из водной толщи в атмосферу - испарение;

(б) функциональный насос, определяющий перемещение части биогенов (nutrients) из воды на территорию окружающих наземных экосистем - совокупность миграционных процессов в связи с вылетом из воды взрослой стадии (имаго) тех насекомых, у которых личиночная стадия была проведена в воде;

(в) аналогичный функциональный насос, перемещающий

часть биогенов из воды на территорию окружающих наземных экосистем - в связи с питанием рыбадных (piscivore) птиц гидробионтами (прежде всего рыбой); при питании рыбадные птицы изымают биомассу рыб из водной экосистемы и тем самым выносят из воды биогенные элементы, содержащиеся в этой биомассе, поскольку эти птицы гнездятся на территории, окружающей водоем или водоток (Остроумов, 2004).

3.3 Механизмы разрушения и фрагментации (мельницы)

К механизмам расщепления загрязняющих веществ, которые мы для краткости называем мельницами, в соответствии с предлагаемой автором теорией, относятся следующие (Остроумов, 2004):

- (а) мельница внутриклеточных ферментативных процессов;
- (б) мельница внеклеточных ферментов, находящихся в водной среде;
- (в) мельница фотохимических процессов, сенсibilизированных веществами биологического происхождения;
- (г) мельница свободно-радикальных процессов с участием лигандов биологического происхождения (Остроумов, 2001а).

В процессах расщепления, разрушения, деградации (биодеградации) загрязняющих веществ большую роль играют микроорганизмы. Роль микроорганизмов в самоочищении воды ни в коей мере нельзя недооценивать - так же, как и роль других групп водных организмов. Более подробно роль микроорганизмов в самоочищении мы рассмотрели в монографии (Остроумов, 2008).

3.4 Механизмы сорбции

В последнее время к предыдущим трем типам механизмов мы добавили еще два типа механизмов. Что касается этих типов механизмов (четвертого и пятого типа механизмов), связанных с сорбцией загрязняющих веществ, то здесь автор считает целесообразным выделить следующие процессы.

Четвертый тип механизмов - сорбция на живых организмах - на поверхности организмов, в том числе одноклеточных и многоклеточных. Такая сорбция может быть очень существенной в случае одноклеточных организмов, у которых суммарная поверхность может быть очень большой. Сорбция может быть очень

значительной также в случае высших растений, которые могут образовывать густые заросли с большой площадью поверхности.

Пятый тип механизмов заслуживает подробного анализа, поскольку можно выделить несколько типов сорбции на субстратах, отличающихся от живых организмов.

(а) Сорбция на мортмассе (mortmass), на поверхности отмерших организмов, на выделенных организмами пеллетах (pellets) и других выделенных частицах и комках органического материала. В водной среде имеется значительное количество взвешенных частиц детрита. Существует аббревиатура ВОВ (взвешенное органическое вещество, suspended organic matter). Общее количество ВОВ значительно превышает общую биомассу живых организмов, населяющих водную среду. В литературе есть большое количество работ, посвященных взвешенному в воде органическому детриту и ВОВ. Отметим работы А.П. Садчикова и соавторов, которые провели большой объем исследований детрита в пресноводных водоемах Московской области. А.П. Садчиков и соавторы отмечали в своих публикациях существенную роль детрита в сорбции загрязняющих веществ.

(б) Сорбция на донных отложениях (bottom sediments) с различным содержанием органического вещества. Донные отложения могут содержать варьирующий процент органического вещества. Сорбция загрязняющих веществ донными отложениями может вносить существенный вклад в удаление этих загрязняющих веществ из толщи воды. Тем самым может снижаться биодоступность (bioavailability) этих веществ для обитателей толщи воды.

(в) Сорбция и комплексообразование с участием растворенного органического вещества (РОВ; dissolved organic matter). Необходимо подчеркнуть, что общая масса РОВ может превышать массу взвешенных в воде частиц детрита на порядок и более. Поэтому связывание загрязняющих веществ с РОВ может играть большую роль в модификации и снижении проявляемого этими загрязняющими веществами токсического воздействия на гидробионты.

(г) Сорбция на поверхности неорганических материалов. Для полноты описываемой картины необходимо отметить роль и неорганических материалов, минералов и т.д. в сорбции и иммобилизации загрязняющих веществ.

Необходимо отметить, что при сорбции и биосорбции загрязняющие вещества не удаляются полностью из окружающей среды. Однако

они оказываются в иммобилизованном состоянии.

Выше мы неоднократно упоминали роль различных биогенных материалов и веществ в сорбции и связанной с ней иммобилизации загрязняющих веществ. Анализ наших экспериментов по этой теме привел нас к выводам о целесообразности выделения биогенного органического вещества, присутствующего в биосфере в огромных количествах, значительно превышающих биомассу, в отдельный тип вещества.

Этому были посвящены наши предыдущие публикации. Мы предложили термин для обозначения разнообразных видов биогенного органического вещества (не входящего в биомассу). Этот предложенный нами термин - БЖВ (бывшее живое вещество). Мы предложили также англоязычный вариант этого термина - ELM (ex-living matter). Анализу связанных с этим научных вопросов посвящен ряд наших предыдущих публикаций.

4. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ

Для энергообеспечения биотических процессов самоочищения используются такие источники энергии, как:

- (а) фотосинтез;
- (б) окисление автохтонной (autochthonous) органики (т. е. органического вещества, образуемого внутри водной экосистемы автотрофными организмами);
- (в) окисление аллохтонной (allochthonous) органики (т. е. того органического вещества, которое попадает в воду извне - например, при смыве воды и частиц почвы с окружающей водоем территории);
- (г) другие окислительно-восстановительные реакции (redox reactions).

Таким образом, задействованы практически все доступные источники энергии. Часть энергообеспечения идет за счет окисления тех самых компонентов (растворенное и взвешенное органическое вещество, dissolved organic matter, suspended organic matter), от которых система избавляется. Иными словами, энергетика процессов самоочищения напоминает энергосберегающие технологии (Остроумов, 2004).

5. НАДЕЖНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ

Надежность системы нередко обеспечивается благодаря дублированию многих компонентов системы. Это выявлено в наших публикациях (Остроумов, 2000 а; Остроумов, 2001 а; Остроумов, 2004; Остроумов, 2008) при анализе функционирования водных экосистем.

Например, фильтрационная активность гидробионтов продублирована следующим образом: ее осуществляют две большие группы организмов - планктон (в толще воды) и бентос (benthos, организмы, живущие на дне водоема). Обе группы организмов фильтруют воду со значительной скоростью (Алимов, 1981; Сущеня, 1975).

Кроме того, бентос дополнительно дублирует деятельность постоянно пребывающих в пелагиали (в толще воды, планктонных организмов благодаря тому, что личинки многих бентосных фильтраторов ведут планктонный образ жизни. В составе планктона имеются две большие группы многоклеточных беспозвоночных фильтраторов - ракообразные (crustaceans) (Сущеня, 1975) и коловратки (rotifers) (Остроумов, 2001 а; Остроумов, 2004; Остроумов, 2008), которые дублируют друг друга.

Есть еще одна большая группа организмов с несколько иным типом питания (простейшие, protists); эта группа организмов также фильтрует воду наряду с фильтрационной активностью многоклеточных фильтраторов (ракообразных и коловраток). Фильтрация воды параллельно ведется и другими организмами.

Процессы ферментативного разрушения поллютантов - еще один центральный механизм самоочищения воды, который параллельно ведут бактерии и грибы. Функцию окисления растворенного органического вещества одновременно осуществляют почти все гидробионты, в той или иной степени способные к поглощению и окислению растворенного органического вещества (хотя имеется специфика в активности конкретных групп организмов).

Еще одним важным элементом надежности является регуляция и саморегуляция биоты.

6. РЕГУЛЯЦИЯ И САМОРЕГУЛЯЦИЯ САМООЧИЩЕНИЯ ВОДЫ

Практически все организмы, активно осуществляющие процессы, ведущие к самоочищению, регулируются двояким образом - с одной стороны, доступностью пищевых ресурсов; с другой стороны, организмами последующего трофического звена в пищевой цепи (trophic chain). Регулирующая роль трофических цепей и трофических сетей очень значительна. Это еще раз подчеркивает высокую значимость биоразнообразия для успешного и стабильного функционирования экосистемных механизмов самоочищения воды. Регулирующая роль организмов может эффективно исследоваться с помощью предложенного нами метода ингибиторного анализа (inhibitory analysis) регуляторных взаимодействий в трофических цепях (Остроумов, 2000 б; Ostroumov, 2002) .

В механизмах регуляции экосистемы значительную роль играют различные формы сигнализации, в том числе химические вещества - носители информации и регуляторных воздействий. Автором было предложено называть такие вещества экологическими хеморегуляторами (ecological chemoregulators) и экологическими хемомедиаторами (ecological chemomediators) (Остроумов, 1986).

Скорость некоторых процессов самоочищения зачастую значительно ниже максимально возможной, на которую способны гидробионты. Например, наблюдаемая скорость фильтрации воды не настолько велика, чтобы до конца извлекать из нее частицы взвешенного органического вещества. Для многих фильтраторов (filter-feeders) показано снижение скорости фильтрации при нарастании концентрации частиц взвешенного вещества (Суценя, 1975).

Однако, такая регуляция механизма самоочищения, приводящая к уменьшению скоростей тех или иных биотических процессов, в конечном итоге может нести позитивную функцию, поскольку обеспечивает определенный баланс, нарушение которого может оказаться опасным.

Например, хотелось бы отметить, что осуществление излишне быстрого разрушения даже нетоксичных органических веществ в воде в результате ускоренного их окисления микроорганизмами может привести к экологически нежелательному результату - быстрому исчерпанию растворенного в воде кислорода. Это вызовет гибель многих аэробных организмов.

Можем привести другой пример: по мнению автора, излишне быстрая фильтрация воды гидробионтами может привести к резкому снижению численности в воде взвешенных в ней микроорганизмов, которые осуществляют многие процессы, важные для самоочистки воды.

Отметим также, что в процессах очищения воды активно участвуют организмы не только водных, но и наземных (terrestrial) экосистем, пограничных с водоемами (water bodies) и водотоками (streams). Многие организмы, которые входят в трофические цепи водных экосистем, проводят значительное время в составе и наземных экосистем.

7. АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Автор провел многочисленные опыты по воздействию потенциальных загрязняющих веществ - на конкретных примерах поверхностно-активных веществ. Например, мы изучали воздействие катионного ПАВ (surfactant) триметиламмоний бромида (tetradecyltrimethylammonium bromide) и синтетических моющих средств на водных беспозвоночных (моллюсков, коловраток, дафний).

Эти наши опыты показали, что процессы фильтрации воды беспозвоночными животными ингибировались при воздействии сублетальных концентраций антропогенных поллютантов, а именно, ПАВ и ПАВ-содержащих смесевых препаратов.

Есть указания на аналогичное действие и других поллютантов на моллюсков и фильтраторов зоопланктона (Остроумов, 2001 а). Это свидетельствует об опасности снижения эффективности механизма самоочистения воды в условиях антропогенных воздействий на водные экосистемы (Остроумов, 2001а; Остроумов, 2002а; Остроумов, 2004; Ostroumov, 2002). Большой объем полученных нами в экспериментах новых фактов о негативном воздействии химических загрязняющих веществ на организмы, участвующие в очищении воды, суммирован в публикациях (Остроумов, 2001а; Остроумов, 2002а; Остроумов, 2004; Остроумов, 2008; Ostroumov, 2005).

Необходимо подробнее осветить вопросы антропогенных воздействий на самоочищение воды в водных экосистемах.

Факты, полученные нами в наших опытах с организмами-

фильтраторами, показали, что негативное воздействие химических загрязняющих веществ на скорость фильтрации ими воды проявляется при концентрациях этих веществ, которые не убивают организмы-фильтраторы. Снижение фильтрационной активности двустворчатых моллюсков мы наблюдали при концентрациях синтетических ПАВ и детергентов, которые были значительно ниже, чем смертельные концентрации этих веществ.

Автор обнаружил это во многих опытах и с пресноводными, и с морскими моллюсками. Среди пресноводных моллюсков мы исследовали массово распространенные виды перловиц (*Unio tumidus*, *Unio pictorum*). Среди морских моллюсков мы изучали также очень широко распространенные виды мидий (*Mytilus edulis*, *Mytilus galloprovincialis*) и устриц (*Crassostrea gigas*). На этих видах мы изучали воздействие анионных ПАВ (додецилсульфат натрия), катионных ПАВ (тетрадецилтриметиламмоний бромид), неионогенных ПАВ (Тритон X-100), а также детергентов нескольких марок. Все эти опыты однозначно показали, что эти вещества, выступая в роли экополлютантов и экотоксикантов, снижали фильтрационную активность моллюсков, воздействуя на них в относительно низких концентрациях, которые не вызывали повышения смертности моллюсков.

При этом необходимо отметить, что традиционные методы оценки опасности химических веществ, загрязняющих водную среду, основаны на выявлении летальных эффектов. Иными словами, вещество считается проявляющим опасные свойства и токсичность, когда в опытах обнаруживается гибель подопытных организмов, на которые воздействует изучаемое вещество. Те вещества, которые при реалистичных концентрациях не вызывали гибели подопытных организмов, считались относительно менее опасными, менее токсичными.

Поэтому при традиционном подходе те загрязняющие воду вещества, которые при реалистичных концентрациях не убивали водные организмы (именно таковы многие ПАВ и детергенты) не попадали в списки наиболее опасных поллютантов. В конечном итоге они ускользали от внимания специалистов, которые выявляли экотоксиканты и поллютанты, наиболее опасные для водных экосистем и организмов.

Поэтому длительное время, вплоть до наших работ по изучению воздействия ПАВ на фильтраторов, существовала недооценка экологической опасности синтетических ПАВ и детергентов.

Установленные в наших работах четкие факты о том, что относительно небольшие, сублетальные концентрации ПАВ и детергентов существенно снижают фильтрационную активность водных организмов-фильтраторов (притом не убивая их), требуют коренным образом пересмотреть и дополнить списки наиболее опасных химических веществ, которые представляют большую экологическую опасность (environmental hazards).

Мы убеждены, что в списки приоритетных химических загрязнителей среды необходимо включать, наряду с тяжелыми металлами и пестицидами, многочисленных химических вещества из класса синтетических ПАВ, детергентов и других химических препаратов и продуктов, в состав которых входят ПАВ. Отметим, что список таких смесевых препаратов и продуктов широк и включает в себя стиральные порошки, жидкие моющие средства для стирки одежды, многие пеномоющие средства для ухода за телом и волосами (жидкое мыло, шампуни).

8. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Вышеупомянутая теория самоочищения воды может быть полезным образом использована для более обоснованного экологического прогнозирования состояния водоемов и водотоков.

Мы предлагаем обратить внимание на то, что практически во всех водных экосистемах, куда поступает антропогенное загрязнение, имеет место алгебраическое суммирование двух разнонаправленных процессов:

с одной стороны, с некоторой скоростью в экосистему входит поток тех или иных загрязняющих веществ, что способствует повышению их концентрации в воде экосистемы;

с другой стороны, с некоторой скоростью идет удаление этих веществ из воды в результате суммы процессов самоочищения; эти процессы были упомянуты в начале этой статьи; тщательная систематизация и классификация этих процессов составляет предмет рассмотрения в нашей экологической теории самоочищения воды.

Принимая предложенный нами подход, можно увидеть: в результате суммирования всех этих разнонаправленных процессов складывается наблюдаемая в данной экосистеме динамика

концентрации каждого из загрязняющих веществ в воде. По нашему мнению, эта динамика может проявить себя как рост концентрации поллютанта во времени или как снижение концентрации с течением времени. Теоретически возможен также случай постоянства концентрации, когда процессы загрязнения и самоочищения полностью уравнивают друг друга.

Наши опыты, упомянутые в предыдущем разделе, хорошо вписываются в теорию самоочищения и указывают место сублетальных воздействий некоторых- поллютантов в общей картине, описывающей экосистему. Если в экосистему поступают поллютанты, снижающие скорость фильтрационной активности гидробионтов-фильтраторов, то судьба этой экосистемы окажется негативной даже в том случае, когда поступление поллютантов сохранится на прежнем уровне и поступление загрязнения не будет расти.

Так получится потому, что, как мы написали выше, имеет место алгебраическое суммирование процессов загрязнения экосистемы и процессов самоочищения. Предложенный нами подход позволяет увидеть и понять, что при снижении скорости самоочищения (это снижение создают поллютанты типа ПАВ и детергентов) алгебраическая сумма меняется даже при постоянстве потока загрязняющих веществ.

Таким образом, наша теория и ее расширение для прогнозирования состояния экосистем дает ключ для более адекватного предсказания состояния водных экосистем.

Недоучет или незнание тех факторов, которые вводятся в рассмотрение предложенной нами теорией, объясняет, почему до сих пор не удавались попытки прогнозировать состояние водных экосистем с течением времени, почему негативные изменения качества воды всегда заставляли нас врасплох, как неприятная неожиданность.

9. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫШЕИЗЛОЖЕННОЙ ТЕОРИИ

Одно из важных направлений для полезного применения вышеизложенной экологической теории касается нового перспективного направления в экологической биотехнологии.

По мнению автора, эта теория помогает четко планировать и осуществлять работу по созданию искусственных природоподобных

(biomimetic) экологических систем, призванных выполнять средоулучшающие и водоочистительные функции. Благодаря вышеизложенной теории можно отчетливо видеть, какие биологические компоненты должны войти в состав таких систем.

Для эксплуатации любой технологической (в том числе биотехнологической) системы необходимо иметь четкое представление, какие именно процессы являются наиболее важными и подлежащими постоянному контролю. Данная теория четко указывает на эти процессы.

Среди структурно-функциональных блоков будущих природоподобных биотехнологических систем существенную роль должен играть блок, представленный вышей водной растительностью. При этом необходимо определить количественные нормативы допустимой нагрузки загрязняющих веществ на этот блок системы.

Этому вопросу и другим проблемам фиторемедиации и фитотехнологии (phytoremediation, phytotechnology) было уделено внимание в работе аспирантки Е.А. Соломоновой, которая успешно выполнила диссертационную работу под руководством автора этой статьи.

Сейчас работу по анализу возможностей практического применения этой теории продолжает другой наш аспирант, С. Цай (X. Cai, КНР). Его исследования вносят вклад в изучение проблем контроля качества воды и оценки экологической опасности загрязняющих веществ (Cai, Ostroumov, 2021).

Вышеизложенная теория имеет и несколько других областей своего возможного применения. Эти области применения идентифицированы в таблице 1.

Таблица 1. Области применения экологической теории, сформулированной в этой статье и предыдущих публикациях автора (orig.).

Table 1. Fields of application of the ecological theory formulated in this article and previous publications of the author (orig.).

Область применения	Каким образом может применяться вышеизложенная теория
Очищение воды в природно-технологических комплексах	Создание природоподобных искусственных экосистем и биоценозов, несущих функцию очищения воды и реализующих набор вышеописанных экологических механизмов
Экономическая оценка услуг водной экосистемы по очищению воды	Рассмотрение технологически моделируемых функций водной экосистемы и монетарная оценка стоимости соответствующих технологических процессов (Остроумов, 2008)
Энергосбережение	Замена энергоемких технологий очищения воды зелеными технологиями на основе природоподобных экосистем и фитотехнологий (Остроумов, 2008)
Уменьшение выбросов углерода (диоксида углерода как тепличного газа) в атмосферу	Замена энергоемких технологий очищения воды зелеными технологиями на основе природоподобных экосистем и использующих фотосинтез фитотехнологий (Остроумов, 2008)
Реализация, имплементация экологического законодательства	Более полная оценка ущерба, нанесенного природным комплексам, с учетом ущерба природным механизмам самоочищения
Сохранение биоразнообразия	Учет дополнительных аргументов в защиту биоразнообразия как носителя полезных и необходимых функций по поддержанию и улучшению качества воды
Экологическое прогнозирование	Использование вышеизложенной теории позволяет выявить и прогнозировать тенденции в изменении состояния водной экосистемы

В дополнение к вышеприведенной таблице, еще одна область применения касается совершенствования экологического и природоохранного образования.

10. БУДУЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В будущем будут установлены новые примеры того, как те или иные водные организмы вносят вклад в самоочищение воды в экосистеме. Будут исследоваться воздействия ранее не изученных химических поллютантов на водные организмы. В том числе, будут

исследоваться воздействия различных химических поллютантов на фильтрационную активность гидробионтов фильтраторов. Автор прогнозирует, что будут найдены новые примеры того, что химические поллютанты снижают фильтрационную активность гидробионтов-фильтраторов.

Будет исследоваться более широкий спектр видов гидробионтов в плане их чувствительности к воздействию загрязняющих веществ. Автор предсказывает, что будут выявлены новые примеры того, что загрязняющие воду вещества снижают функциональную активность гидробионтов, вносящую вклад в самоочищение воды и поддержание ее качества.

Еще одним продуктивным направлением исследований станет более подробное изучение различных форм детрита и неживого органического вещества в водных экосистемах. При этом будет уделяться внимание сорбционным свойствам этого детрита и органического вещества по отношению к различным химическим поллютантам. Будет изучаться более подробно и более широко, чем сейчас, содержание органического вещества в донных осадках.

Будет проводиться более широкое и подробное изучение экосистемных услуг водных экосистем, включая самоочищение воды.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сказанное в данной статье наглядно иллюстрирует ранее недооцениваемые полезные функции биоразнообразия, в том числе биоразнообразия водных организмов, а также наземного биоразнообразия в местообитаниях, прилегающих к водоемам и водотокам. Даже многие специалисты недостаточно полно знают важные детали этих функций, не говоря о широких слоях населения.

При совершенствовании экологического и природоохранного образования необходимо уделить должное внимание тому, чтобы современные научные знания о полезных и необходимых функциях живых организмов в направлении поддержания и сохранения качества воды были доведены до осознания и понимания в максимально широкой аудитории.

Используя изложенную теорию и данные нашей экспериментальной работы (Ostroumov, 2005; Остроумов, 2008) и других публикаций, можно сформулировать выводы и рекомендации, важные для

оптимального управления водными ресурсами и сохранения водно-биологических ресурсов (Хамитов, Остроумов, 2004) .

Главные выводы , которые получены в результате научных исследований автора, освещенных в данной работе, таковы:

(1) Необходимым элементом природоохранной стратегии должно быть сохранение самоочистительного потенциала водоемов и водотоков.

(2) Необходимо сохранять все или почти все разнообразие водных организмов в экосистемах.

(3) Автор хотел бы подчеркнуть, что в процессах регуляции популяций организмов, вовлеченных в очищение воды активно участвуют организмы не только водных, но и наземных экосистем, пограничных с водоемами и водотоками. Поэтому для сохранения качества воды необходима охрана биоразнообразия и этих прибрежных наземных экосистем.

Автор продолжает изучение природных механизмов очищения воды, - исследования, которые полезны и необходимы для достижения целей оптимального и устойчивого использования водных ресурсов, водоснабжения и водоочистки. Публикации автора в этом направлении получили положительную оценку и поддержку специалистов, цитировались многими исследователями (например, Добровольский и др., 2008; Malakhov, 2004; Rozenberg, 2005; Vaugh et al., 2008).

БЛАГОДАРНОСТЬ Автор благодарен коллегам из Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и Российской академии наук (РАН) за обсуждение ряда затронутых вопросов. Приношу особую благодарность академику РАН В.В. Малахову, члену-корреспонденту РАН Е.А. Криксунову, члену-корреспонденту РАН Г.С. Розенбергу, профессору В.В. Ермакову и Prof. Larisa Jovanovic за полезные комментарии и советы.

ЛИТЕРАТУРА

- Алимов А.Ф. (1981). *Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков*. Ленинград, Наука, 248 с.
- Алимов А.Ф. (2000). *Элементы теории функционирования водных экосистем*. Санкт-Петербург, Наука, 147 с.
- Добровольский, Г.В., Розенберг, Г.С., & Тодераш, И.К. (2008). *Открытие нового вида опасных антропогенных воздействий в экологии животных и биосфере: ингибирование фильтрационной активности моллюсков поверхностно-активными веществами*. Москва, МАКС-Пресс, 108 с.
<http://scipeople.com/publication/68661/>;
<https://www.researchgate.net/publication/308515104>;
- Остроумов, С.А. (1986). *Введение в биохимическую экологию*. М.: Изд-во МГУ, 176 с. <https://www.academia.edu/45181629/>;
<http://www.scribd.com/doc/80564027/>;
<https://istina.msu.ru/publications/book/608801/>.
- Остроумов, С. А. (2000 а). Водная экосистема: крупноразмерный диверсифицированный биореактор с функцией самоочищения воды. *Доклады академии наук*. 374 (3), 427-429.
<https://www.academia.edu/1012207/>.
- Остроумов, С. А. (2000 б). Ингибиторный анализ регуляторных взаимодействий в трофических сетях. *Доклады Академии наук*. 375 (6), 847-849. <https://www.academia.edu/45953417/>.
- Остроумов, С. А. (2000 в). Концепция водной биоты как лабильного и уязвимого звена системы самоочищения воды. *Доклады академии наук*. 372 (2) 279-282.
<https://istina.msu.ru/publications/article/1062062/>;
<https://www.academia.edu/37989611/>.
- Остроумов, С.А. (2001 а). *Биологические эффекты при воздействии поверхностно-активных веществ на организмы*. Москва, МАКС-Пресс, 334 с.
<https://istina.msu.ru/publications/book/610751/>;
<https://www.researchgate.net/publication/266193942>;
http://5bio5.blogspot.com/2016/09/blog-post_86.html.
- Остроумов, С.А. (2001 б). Синэкологические основы решения проблемы эвтрофирования. *Доклады Академии наук*, 381 (5), 709-712. <https://www.academia.edu/790367/>.

- Остроумов, С. А. (2002 а). Идентификация нового вида опасности химических веществ: ингибирование процессов экологической ремедиации. *Доклады Академии наук*, 385 (4), 571-573.
<https://www.academia.edu/2525080/>;
<https://www.researchgate.net/publication/303372760>.
- Остроумов, С. А. (2002 б). Система принципов для сохранения биогеоэкологической функции и биоразнообразия фильтраторов. *Доклады Академии Наук*, 383 (5), 710-713.
<https://www.academia.edu/49281720/>;
<http://istina.msu.ru/publications/article/1062629/>.
- Остроумов, С.А. (2002 в). Сохранение биоразнообразия и качество воды: роль обратных связей в экосистемах. *Доклады Академии наук*, 382 (1), 138-141. <https://www.academia.edu/790370/>.
- Остроумов, С. А. (2003). О функциях живого вещества в биосфере. *Вестник Российской академии наук*, 73(3), 232-238.
<https://www.academia.edu/44001275/>;
<https://www.researchgate.net/publication/265053439>.
- Остроумов, С. А. (2004). О биотическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории. *Доклады Академии Наук*, 396 (1), 136-141. <https://www.researchgate.net/publication/265294672>;
- Остроумов, С.А. (2008). *Гидробионты в самоочищении вод*. Москва, МАКС-Пресс. 200 с.
<https://www.researchgate.net/publication/266200066>.
- Сущеня, Л.М. (1975). *Количественные закономерности питания ракообразных*. Минск, Наука и техника, 208 с.
- Хамитов, Р.З., & Остроумов, С.А. (2004). О некоторых задачах в области сохранения водных ресурсов, управления ими и создания научных основ и научно-организационных предпосылок для их устойчивого использования. *Водные экосистемы и организмы*, 7, 94.
- Cai, X., & Ostroumov, S. A. (2021). Finding of toxicity of herbal shampoo to plant seedlings: phytotest of mixture product that contains membranotropic chemicals as components. *Ecologica*, 28(101), pp. 6-10.
- Malakhov, V.V. (2004). Review of the book (Ostroumov, S.A., 2004. Biotic Mechanism of Self-purification of Freshwater and Marine Water. MAX Press, Moscow). *Ecological Studies, Hazards, Solutions*, 10, p. 138.

- Ostroumov, S. A. (2002). Inhibitory analysis of top-down control: new keys to studying eutrophication, algal blooms, and water self-purification. *Hydrobiologia*, 469(1), pp.117-129.
<https://www.researchgate.net/publication/200587396>.
- Ostroumov, S. A. (2005). *Biological effects of surfactants*. Boca Raton, London, New York, CRC Press, Taylor & Francis. 279 p.
<https://www.researchgate.net/publication/200637626>.
- Ostroumov, S. A. (2009). Towards the general theory of ecosystem-dependent control of water quality. *Ecologica*, (54), pp. 25-32.
- Rozenberg, G.S. (2005). Review of the book (Ostroumov, S.A., 2004. Biotic Mechanism of Self-purification of Freshwater and Marine Water. MAX Press, Moscow). *Advances of Modern Biology (Uspekhi sovremennoi biologii)*. 3, pp. 317-318.
- Vaughn, C. C., Nichols, S. J., & Spooner, D. E. (2008). Community and foodweb ecology of freshwater mussels. *Journal of the North American Benthological Society*, 27(2), pp. 409-423.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. Gulf Professional Publishing.

ADDITIONAL READING

- Lazareva, E. V., & Ostroumov, S. A. (2009). Accelerated decrease in surfactant concentration in the water of a microcosm in the presence of plants: innovations for phytotechnology. *Doklady Biological Sciences*, vol. 425, No. 1, p. 180.
- Ostroumov, S. A. (1998). Biological filtering and ecological machinery for self-purification and bioremediation in aquatic ecosystems: towards a holistic view. *Rivista di Biologia/Biology Forum*, Vol. 91, No. 2, pp. 221-232.
- Ostroumov, S. A. (2000). An aquatic ecosystem: a large-scale diversified bioreactor with a water self-purification function. *Doklady Biological Sciences*, 374, pp. 514-516.
- Ostroumov, S. A. (2000). The concept of aquatic biota as a labile and vulnerable component of the water self-purification system. *Doklady Biological Sciences*, Vol. 372, pp. 286-289.
- Ostroumov, S. A. (2002). Biodiversity protection and quality of water: the role of feedbacks in ecosystems. *Doklady Biological Sciences*, vol. 382, No. 1, pp. 18-21.

- Ostroumov, S. A. (2002). Identification of a new type of ecological hazard of chemicals: inhibition of processes of ecological remediation. *Doklady Biological Sciences*. Vol. 385, No. 1, pp. 377-379.
- Ostroumov, S. A. (2002). Polyfunctional role of biodiversity in processes leading to water purification: current conceptualizations and concluding remarks. *Hydrobiologia*, 469(1), pp. 203-204.
- Ostroumov, S. A. (2002). System of principles for conservation of the biogeocenotic function and the biodiversity of filter-feeders. *Doklady Biological Sciences*, vol. 383, No. 1, pp. 147-150.
- Ostroumov, S. A. (2003). Anthropogenic effects on the biota: towards a new system of principles and criteria for analysis of ecological hazards. *Rivista di Biologia / Biology Forum*, Vol. 96, No. 1, pp. 159-169.
- Ostroumov, S. A. (2004). Aquatic ecosystem as a bioreactor: water purification and some other functions. In *Rivista di Biologia/Biology Forum*, Vol. 97, No. 1, pp. 67-78.
- Ostroumov, S. A. (2004). On the biotic self-purification of aquatic ecosystems: elements of the theory. *Doklady Biological Sciences*, Vol. 396, pp. 206-211.
- Ostroumov, S. A. (2004). The effect of synthetic surfactants on the hydrobiological mechanisms of water self-purification. *Water Resources*, 31(5), pp. 502-510.
- Ostroumov, S. A. (2004). The theory of the hydrobiological mechanism of water self-purification in water bodies: from theory to practice. In *Abstracts of Proceedings of the 4th International Iran and Russia Conference in Agriculture and Natural Resources*. (Shahrekord, Iran. September 8-10), p. 1251.
- Ostroumov, S. A. (2005). Filter-feeders as part of ecological biomachinery to purify water. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 29(2), pp. 1072-1074.
- Ostroumov, S. A. (2005). On some issues of maintaining water quality and self-purification. *Water Resources*, 32(3), pp. 305-313.
- Ostroumov, S. A. (2005). On the multifunctional role of the biota in the self-purification of aquatic ecosystems. *Russian Journal of Ecology*, 36(6), pp. 414-420.
- Ostroumov, S. A. (2005). Suspension-feeders as factors influencing water quality in aquatic ecosystems. In: *The comparative roles of suspension-feeders in ecosystems* (pp. 147-164). Springer,

- Ostroumov, S. A. (2006). 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*, 1(1), pp. 111-118.
- Ostroumov, S. A. (2008). Basics of the molecular-ecological mechanism of water quality formation and water self-purification. *Contemporary Problems of Ecology*, 1(1), pp. 147-152.
- Ostroumov, S. A. (2008). On the concepts of biochemical ecology and hydrobiology: Ecological chemomediators. *Contemporary Problems of Ecology*, 1(2), pp. 238-244.
- Ostroumov, S. A. (2010). Biocontrol of water quality: Multifunctional role of biota in water self-purification. *Russian Journal of General Chemistry*, 80(13), pp. 2754-2761.
- Ostroumov, S. A. (2016). Searching approaches to solving the problem of global change: elements of the theory of the biotic-ecosystem mechanisms of the regulation and stabilization of parameters of the biosphere, geochemical and geological environment. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya*, (1), pp. 24-33.
- Ostroumov, S. A. (2017). New Aspects of the Role of Organisms and Detritus in the Detoxification System of the Biosphere. *Russian Journal of General Chemistry*, 87(13), pp. 3190-3198.
- Ostroumov, S. A. (2017). Water quality and conditioning in natural ecosystems: biomachinery theory of self-purification of water. *Russian Journal of general chemistry*, 87(13), pp. 3199-3204. DOI:10.1134/S107036321713014X;
- Ostroumov, S. A. (2019). Scientific issues connected with aquatic ecosystem services and their valuation: quantitative assessment using the innovative theory of water self-purification. *Biodiversity and Ecosystem Services - Management Principles in the Russia and International Processes*, p.49.
- Ostroumov, S. A. (2019). Scientific issues connected with aquatic ecosystem services and their valuation: quantitative assessment using the innovative theory of water self-purification. *Biodiversity and Ecosystem Services - Management Principles in the Russia and International Processes*, p.49.
- Ostroumov, S. A., & Kolesov, G. M. (2010). The role of biodetritus in accumulation of elements in aquatic ecosystems. *Contemporary Problems of Ecology*, 3(4), 369-373. DOI:10.1134/S1070363217130138;

- Ostroumov, S. A., & Sadchikov, A. P. (2018). Dynamics of the Content of Nitrogen, Phosphorus, and Carbon in the Detrital Particles Suspended in Water Phase of Ecosystems: Consideration of Water Quality Formation and Exometabolism. *Russian Journal of General Chemistry*, 88(13), pp. 2912-2917.
DOI:10.1134/S1070363218130145;
- Ostroumov, S. A., & Shestakova, T. V. (2009). Decreasing the measurable concentrations of Cu, Zn, Cd, and Pb in the water of the experimental systems containing *Ceratophyllum demersum*: The phytoremediation potential. *Doklady Biological Sciences*, Vol. 428, No. 1, p. 444.
- Ostroumov, S. A., & Widdows, J. (2006). Inhibition of mussel suspension feeding by surfactants of three classes. *Hydrobiologia*, 556(1), pp. 381-386.
- Ostroumov, S. A., Johnson, M. E., Tyson, J. F., & Xing, B. (2015). Immobilization of scandium and other chemical elements in systems with aquatic macrophyte. *Russian Journal of General Chemistry*, 85(13), pp. 2929-2932.
- Ostroumov, S. A., Johnson, M. E., Tyson, J. F., & Xing, B. (2015). Immobilization of scandium and other chemical elements in systems with aquatic macrophyte. *Russian Journal of General Chemistry*, 85(13), pp. 2929-2932.
- Ostroumov, S. A., Tropin, I. V., & Kiryushin, A. V. (2018). Removal of Cadmium and Other Toxic Metals from Water: Thermophiles and New Biotechnologies. *Russian Journal of General Chemistry*, 88(13), pp. 2962-2966. DOI:10.1134/S1070363218130224.