

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЧНОЙ ВОДЫ И РОЛЬ БИОЛОГИЧЕСКИ ОЧИЩЕННЫХ ВОД В САМООЧИЩЕНИИ

© 2010 г. Н.М. Щеголькова, П.С. Шашкина

Московское государственное унитарное предприятие «Мосводоканал», Москва

Ключевые слова: самоочищение водотоков, биологически очищенные воды, управление качеством воды, экологический мониторинг, нитрификация, денитрификация, экотон.

В реках с диффузным загрязнением интенсификация самоочищения — основной способ управления качеством воды. Река Москва испытывает экстремальную антропогенную нагрузку. Гидрохимический и гидробиологический мониторинг на участке от входа в город до устья выявил факторы, от которых зависит самоочищение. Работа демонстрирует регулирование процессов самоочищения через настройку экосистемы реки в районе выпуска биологически очищенных вод.



Н.М. Щеголькова



П.С. Шашкина

Введение

Увеличение плотности населения в городских агломерациях создает экстремальные нагрузки на водоемы и водотоки, качество воды в реках ухудшается. В связи с этим пристальное внимание уделяется совершенствованию технологий очистки стоков. Для достижения российских нормативов недостаточно использовать классические технологии биологической очистки. Необходимо применять очистку с удалением

Водное хозяйство России № 2, 2010

Водное хозяйство России

биогенных элементов, технологии глубокой доочистки и обеззараживания стоков. Все это повышает энергозатраты и общую стоимость работ. При этом доказано, что в городах с раздельной системой канализации большая часть загрязнений поступает с поверхностными водами с городской территории, так называемыми, диффузными источниками загрязнения.

Для точечных источников загрязнения наблюдаются многолетние тренды улучшения качества воды [1], что обусловлено:

- развитием технологий очистки;
- современной системой нормирования (ПДС);
- существующей системой экологического мониторинга, направленной на поиск загрязнителя, т. к. «загрязнитель платит».

Значимое снижение нагрузки от диффузных источников невозможно, т. к. на городских территориях сохраняется (и усугубляется) загрязненность почв и грунтов. Решением проблемы является интенсификация процессов самоочищения в водоприемнике. Процессы самоочищения разнообразны, и методы их интенсификации относятся к химическим, физическим и биологическим (рис. 1).

Методы интенсификации самоочищения для водотоков и водоемов не совпадают. Речные экосистемы, являясь неравновесными [2], отлично от других экосистем откликаются на любые внешние воздействия. Различные воздействия: гидрологические (приточность), гидрохимические (поступление аллохтонного вещества), гидробиологические (попадание в реки гидробионтов из придаточных водоемов) всегда существовали и являлись ведущими факторами в жизни речных экосистем [3]. Именно на реках наиболее эффективны проекты по интенсификации самоочищения. Например, очистка рек, текущих через Чикаго в оз. Мичиган, основана на отказе городской администрации от строительства энергоемких и материало-затратных сооружений доочистки на выпусках стоков, а глубокая доочистка перенесена непосредственно в городские реки (SEPA Stations). На этих речных сооружениях происходит интенсивное окисление органического вещества за счет естественной аэрации. Экономически это более выгодно, чем строительство множества очистных сооружений для каждого отдельного стока.

В Чикагском проекте, как и в других подобных, не используются потенциальные возможности биологически очищенных вод. В городах же существуют два типа принципиально различных стоков (табл. 1).

Зона выпуска биологически очищенных вод (БОВ) рассматривается нами как экотон — переходное пространство между природными средами. Именно экотоны являются наиболее управляемыми системами [4].

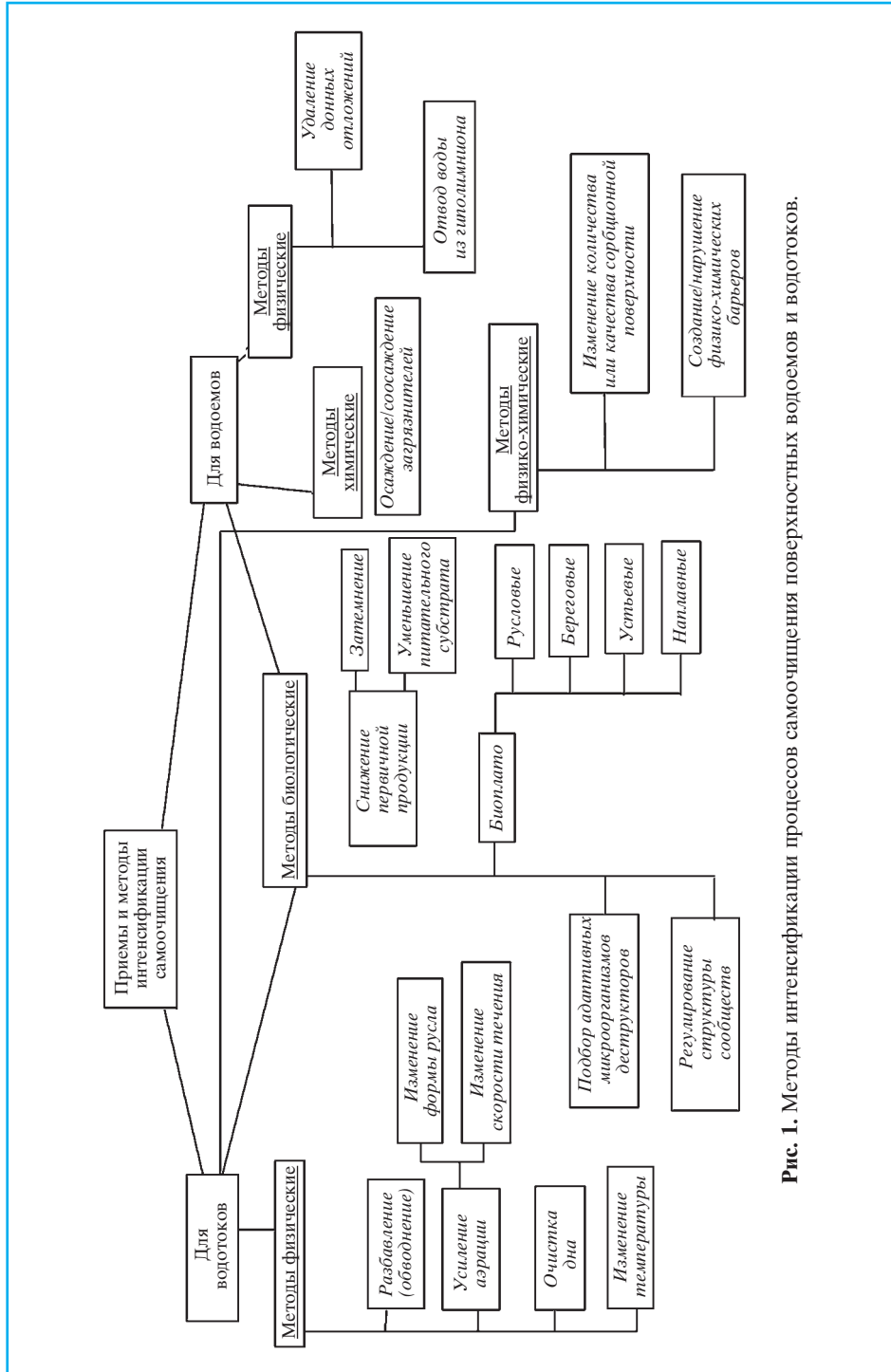


Рис. 1. Методы интенсификации процессов самоочищения поверхностных водоемов и водотоков.

Таблица 1. Два типа городских сточных вод

Характеристика стоков	Ливневые и промышленные стоки	Стоки сооружений очистки коммунальных вод
Качественные особенности	Органические токсиканты, тяжелые металлы, нефтепродукты, взвешенные вещества, т. д.	Биогенные элементы, взвешенное и растворенное органическое вещество
Наличие биологической составляющей	Нет	Бактериопланктон (активный ил)
Температура	Редко повышенная	Всегда повышенная
Токсичность по биотестированию	Как правило, токсичны	Мало- или нетоксичны (при современных технологиях очистки)
Возможность оперативно менять их качество	Невозможно	Возможно в течение суток и часов
Периодичность в поступлении	Отсутствие периодичности	Суточные, сезонные ритмы (по качеству и количеству)

Эффективную систему реабилитации рек-водоприемников следует создать в районе выпуска БОВ.

Цель работы: доказать возможность регулирования процессов самоочищения через настройку экосистемы в районе выпуска БОВ и найти подходы к экомониторингу для осуществления данного регулирования.

Объекты и методы

Река Москва — это зарегулированный водоток с антропогенно измененным режимом. Естественный расход реки увеличен более чем два раза (волжской водой). Очищенные воды составляют 55 % от общего стока ниже города. Выпуск Курьяновских очистных сооружений (КОС) расположен в городской черте, Люберецких (ЛОС) — за ее пределами (рис. 2). Работа выполнена на базе данных, созданной химическими, биологическими и гидрологическими наблюдениями МГУП «Мосводоканал» за период 1898—2007 гг. По стандартным методикам анализировались состав воды, донных отложений и биота реки. Характерные участки реки (выше и ниже выпусков очистных сооружений, рис. 2) рассматривались как проточный биореактор и для них рассчитывались скорости самоочищения по N (мг/л·сут), биоокисляемому органическому веществу (мг O₂/л·сут), скорости прироста фито- и бактериопланктона (мг/л·сут) [5].

Кроме того, проводилось лабораторное моделирование процессов самоочищения. В модельных установках определялись: скорость

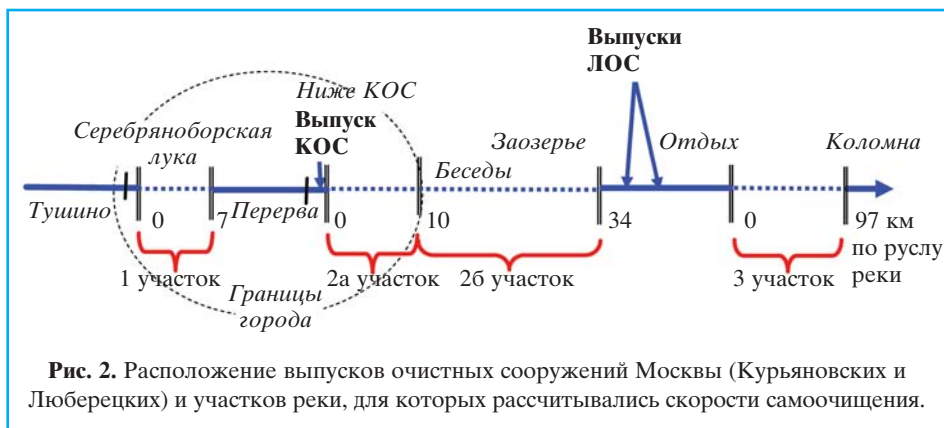


Рис. 2. Расположение выпусков очистных сооружений Москвы (Курьяновских и Люберецких) и участков реки, для которых рассчитывались скорости самоочищения.

очищения воды по азоту (аммонийному, нитритному, нитратному, общему), фосфатам, БПК, прирост планктонного сообщества, оценивалась скорость денитрификации в донных отложениях по изменению содержания нитратов, определялась изотерма сорбции для взвешенных веществ (речных и сформированных на очистном сооружении) [5, 6].

Результаты и обсуждение

Интенсивность окисления органического вещества (ОВ) в реке определяет содержание O_2 , который, в свою очередь, влияет на структуру биоценоза реки. Именно анаэробные процессы в реках (с выделением неприятных запахов) «заставили» человечество строить очистные сооружения для бытовых стоков. Биохимическое окисление очищенных вод (ОВ) на очистных сооружениях было первым биологическим процессом, с которого началось управление качеством воды в речном бассейне. Первые очистные сооружения проектировались с учетом очистки воды по двум показателям — взвешенные вещества и БПК. Нагрузка на водоприемник не должна была снижать содержание растворенного O_2 в нем менее критического значения [7].

С изменением технологии очистки увеличивалась эффективность работы очистных сооружений, повышалось качество очистки. Если для БПК₅ полей орошения обычными являлись значения в 20—40, то очищенная вода нынешних сооружений, спроектированных на полную биологическую очистку, характеризуется значениями БПК₅ < 10 мг O_2 /л. Значения БПК₅ р. Москва в черте города в разные периоды XX в. менялись от <1 в начале, до 15—20 в его середине и снижались до значений ~2—4 мг O_2 /л в конце века.

С середины 1970-х гг. нагрузка выше выпуска КОС не превышает критическую, а с 1996 г. нагрузка на выходе из города стала ниже или на уровне критической, что сразу отразилось на кислородном режиме реки в городской черте (рис. 3а, 3б). С середины 90-х гг. содержание кислорода в реке на выходе из города не опускается ниже 5 мг/л, в среднем — 7 мг/л.

С этого периода содержание кислорода и БПК перестали быть основными показателями оценки экологического состояния реки. Чтобы оценить влияние биологически очищенных вод (БОВ) на реку были изучены скорости самоочищения и скорости прироста планктонных сообществ в характерных участках реки [8]. Было показано, что от биологически очищенных стоков напрямую зависят процессы самоочищения, как биологические (нитри-денитрификация), так и физико-химические (сорбция консервативных загрязняющих веществ) [9]. Кроме того, ниже выпусков формируется устойчивый во времени биоценоз, который активно участвует в деструкции аллохтонного ОВ (рис. 4).

Можно ли целенаправленно управлять процессами самоочищения в реке? Например, самоочищением реки от избыточного азота. В предыдущих работах [10] было установлено, что река ниже выпуска биологически очищенных стоков с середины 90-х гг. функционирует как проточный нитри-денитрификационный реактор (ПНДР) (рис. 5).

Основными этапами формирования ПНДР были:

1. Формирование нитрифицирующего биоценоза на московских сооружениях очистки (КОС и ЛОС).
2. Формирование стабильно благоприятного кислородного режима в реке.
3. Снижение токсичности речной воды.

Эффективность функционирования ПНДР была показана по увеличению самоочищения реки в нижнем течении от азота до 50—80 % от поступления со стоками Москвы. Влияние биологически очищенных стоков на самоочищение доказано по наличию прямой зависимости эффективности удаления азота рекой от содержания нитрифицирующих бактерий в стоках [10].

Развитие стабильно функционирующего бактериоценоза в реке по удалению $N-NH_4$ (бактерий-нитрификаторов) определяется обнаруженной нами корреляцией между скоростью удаления $N-NH_4$ (мкг/л·сут) на участке Ниже КОС-Заозерье и концентрацией $N-NH_4$ в пункте Ниже КОС. В последние годы коэффициент корреляции составляет 0,81 (рис. 6а), тогда как в 70-е годы корреляция вообще отсутствовала (рис. 6б).

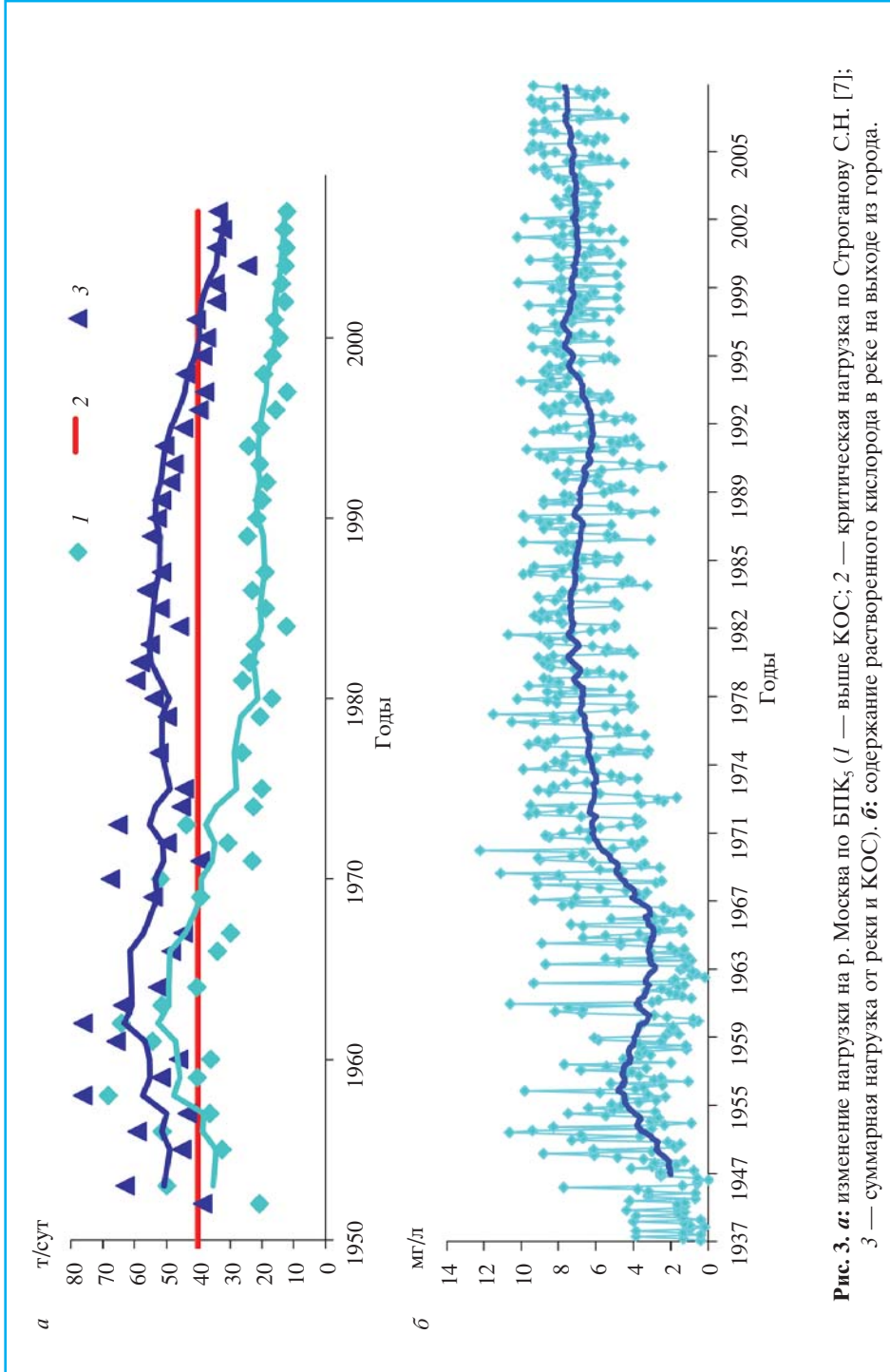


Рис. 3. а: изменение нагрузки на р. Москва по БПК₅ (1 — выше КОС; 2 — критическая нагрузка по Строганову С.Н. [7]; 3 — суммарная нагрузка от реки и КОС). **б:** содержание растворенного кислорода в реке на выходе из города.

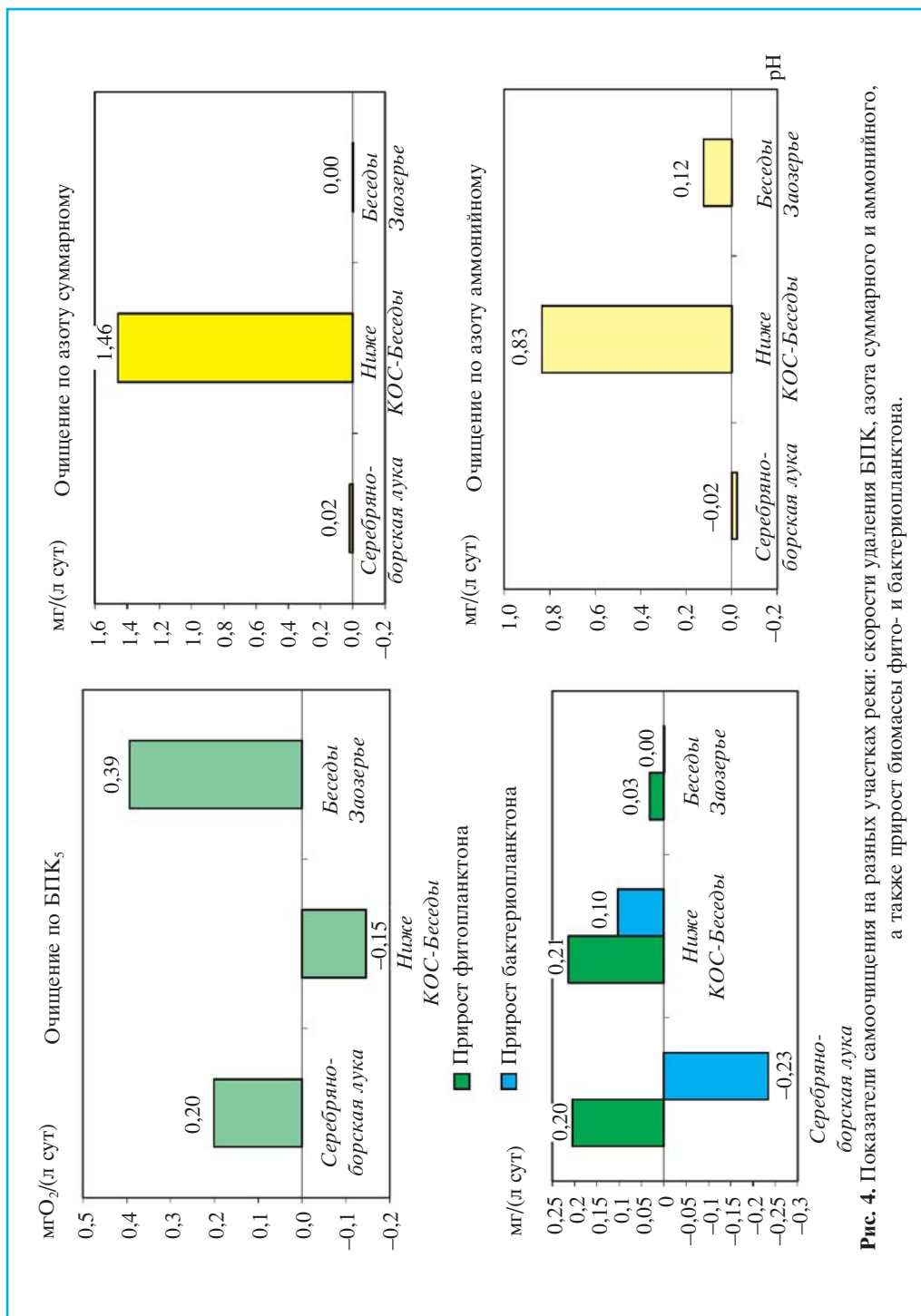
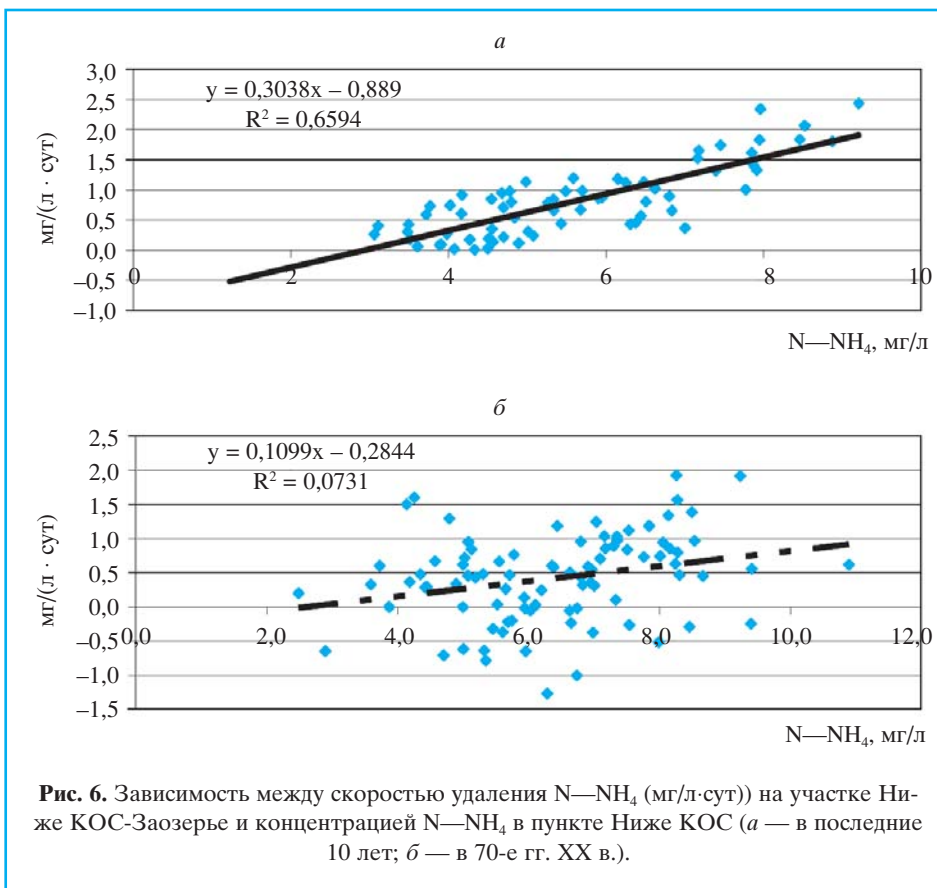
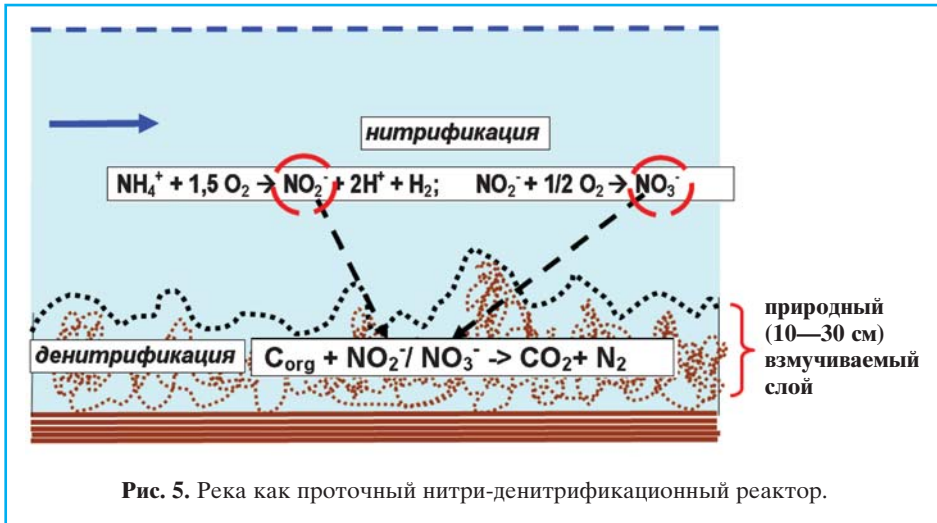


Рис. 4. Показатели самоочищения на разных участках реки: скорости удаления БПК, азота суммарного и аммонийного, а также прирост биомассы фито- и бактериопланктона.



Нитрификация в толще воды приводит к непрерывному образованию нитритов, часть которых идет на денитрификацию (для денитрифицирующих бактерий использование $N-NO_2$ предпочтительней, чем $N-NO_3$) [11]. Одновременное протекание процессов нитри- и денитрификации обеспечивается существованием в реке постоянно взмучиваемого (из-за высоких скоростей течения) придонного слоя (10—30 см). Нитриты и нитраты непрерывно «поставляются» в нижний денитрифицирующий слой турбулентной диффузией, в результате чего в толще воды происходит нитрификация, в придонном слое — денитрификация.

Регулирование скорости самоочищения от N может производиться путем изменения параметров:

- содержания биомассы бактерий-нитрификаторов в БОВ;
- скорости течения реки (уменьшение-увеличение денитрифицирующего слоя);
- содержания растворенного кислорода в БОВ.

Процессы удаления азота из реки напрямую связаны с процессами удаления токсичной органики из воды и донных отложений. Органические поллютанты в значительных количествах поступают в реку с поверхностным стоком выше первого выпуска БОВ (КОС): здесь фиксируется повышенное содержание нефтепродуктов, фенолов, СПАВ. Время микробиологической деструкции зависит от формирования специфического бактериального сообщества. Интенсивнее процессы самоочищения происходят там, где нет дефицита биогенов, необходимых для развития бактериоценозов [12]. Исследователями отмечалось, что процесс денитрификации сопровождается разложением следующих веществ: гербицидов [13], бензойных кислот [14, 15], фенола, м-крезола, толуола [15, 16], н-гетероциклических соединений [17] и т. д. Все вышесказанное свидетельствует о том, что процесс денитрификации напрямую связан с очищением реки от органических поллютантов. То есть до момента, пока не прекратится поступление с поверхностным стоком токсических органических соединений, содержание форм азота и взвешенных веществ (содержание биомассы бактерий) в БОВ должно обеспечивать эффективную денитрификацию в реке.

Если выше выпуска БОВ происходит чрезвычайное загрязнение органическим поллютантом, эффективным способом очистки послужит выпуск активного ила в реку в момент приближения «пятна» к очистному сооружению. За несколько суток можно сформировать на очистном сооружении бактериоценоз, использующий органический токсикант в роли субстрата [18]. При загрязнении реки соединением, образующим поверхностную пленку (нефтепродукты, например), следует сформировать в районе выпуска БОВ участок, куда с помощью бонов будет «транспортирован» загрязнитель для контакта с адаптированным активным илом.

Кроме того, методом регулирования качества воды при чрезвычайном загрязнении является увеличение содержания взвешенных веществ (ВВ) (сорбция с дальнейшей седиментацией в зонах с пониженной скоростью течения). Проведенные нами опыты показали, что ВВ выпуска очистных сооружений (активный ил) приближаются по сорбционным свойствам к активированному углю [6].

Основа современной биологической очистки — селекция микробиоценозов, способных к эффективному удалению загрязнений. В последнее десятилетие нами наблюдается значительное увеличение видового разнообразия фито- и зоопланктона в БОВ. На видовом составе микропланктона отразилось внедрение на отдельных блоках КОС и ЛОС технологий очистки от биогенных элементов. При развитии данных технологий на московских очистных сооружениях гидробионты БОВ будут оказывать значительное влияние на структуру экосистемы реки. А это значит, что необходимо уже сейчас разрабатывать технологические приемы для управления биологическими процессами с использованием формирующегося в данной зоне специфического биоценоза. Найденные в нашей работе закономерности открывают путь к регулированию самоочищения в районе выпуска БОВ, что при чрезвычайной нагрузке от диффузных источников едва ли не единственный способ восстановления качества речной воды. Поэтому, на наш взгляд, тонкая настройка экосистемы реки — чрезвычайно перспективное научно-техническое направление.

Как быстро можно изменять параметры БОВ, чтобы влиять на процессы самоочищения? Техническая возможность изменения содержания взвешенных веществ и растворенного кислорода — несколько часов, тогда как величины биомассы бактерий-нитрификаторов и наличия адаптированных гидробионтов — несколько суток/недель.

Что необходимо сделать, чтобы интенсифицировать удаление азота и органических токсикантов в реке? Необходимо обеспечить непрерывное поступление в реку «полезного биоценоза», а это значит, что вопросы обеззараживания стоков, так же как и глубокая доочистка стоков нуждаются в эколого-экономическом обосновании для каждого конкретного случая. Нормативы по N и взвешенным веществам для БОВ должны быть разработаны с учетом данного процесса.

Экономя на глубокой доочистке и обеззараживании стоков, необходимо предусмотреть повышение эффективности ПНДР в самой реке. Строительство биоплато ниже выпуска БОВ — одно из решений повышения эффективности ПНДР. Надо иметь в виду:

— все биоплато могут иметь дополнительную функциональную нагрузку (расширение набережных, общественно-полезные сооружения на воде и т. п.);

— очистка воды на биоплато от азота и ОВ не требует энергетических затрат: используется энергия течения реки (для перемешивания) и энергия химических связей аллохтонного органического вещества (для протекания реакций очистки).

Таким образом, в региональном масштабе применение тонкой настройки экосистемы реки позволит снизить энергетические и финансовые затраты.

Выводы

— Участки рек ниже выпусков бытовых стоков — характерный объект для тонкой настройки речной экосистемы.

— При проведении экомониторинга этих участков они должны рассматриваться как проточный биореактор, показателями функционирования биореакторов являются скорости самоочищения и скорости прироста планктонных сообществ.

— Управляемые структурно-функциональные изменения на этих участках определяют процессы самоочищения реки от азота и органических токсикантов, а также сорбцию консервативных токсикантов.

— Найденные закономерности открывают новое направление в проектировании сооружений доочистки в водотоках.

— Эколого-экономический эффект очистки стоков должен рассматриваться комплексно для системы «очистное сооружение + участок реки ниже выпуска».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щеголькова Н.М.* Влияние города на формирование экологического состояния реки Москвы (исторический аспект) // *Водные ресурсы*. 2007. Т. 34. № 2. С. 238—248.
2. *Fisher S.G.* Succession in streams // *Stream ecology: application and testing of general ecological theory*. New York: Plenum Press. 1983. P. 7—27.
3. *Крылов А.В.* Распределение зоопланктона по продольному профилю двух нарушенных малых рек бассейна Верхней Волги // *Экология*. 2004. № 5. С. 358—365.
4. *Залетаев В.С.* Структурная организация экотон в контексте управления / Сб. *Экотоны в биосфере*. М.: РАСХН, 1997. С. 11—30.
5. *Щеголькова Н.М.* Лабораторное моделирование процессов перераспределения веществ в урбанизированных ландшафтах // Тезисы 4 съезда Докучаевского общества почвоведов. Новосибирск, 2004. С. 320.
6. *Шапкина П.С., Щеголькова Н.М., Дедков Ю.М.* Сорбционные возможности речных взвешенных веществ в зависимости от генезиса твердой фазы // VII Всероссийская конф. по анализу окружающей среды «Экоаналитика-2009»: сб. докладов. Йошкар-Ола, 2009. С. 16—17.
7. *Попова Н.М.* Санитарное состояние р. Москвы по многолетним гидрохимическим данным (обзор литературы по 1965 г.) // *Процессы загрязнения и самоочищения реки Москвы*. М.: Стройиздат, 1972. С. 23—50.

8. Щеголькова Н.М., Криксунов Е.А. Пушкарь В.Я., Бурменский В.А., Бобырев А.Е. Роль биоценоза городской реки в самоочищении // Канализация Москвы: десять лет в новом веке. М.:ООО «Современная Полиграфия», 2008. С. 333—342.
9. Щеголькова Н.М. Некоторые закономерности распределения тяжелых металлов в донных отложениях среднего течения р. Москвы // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 68—71.
10. Щеголькова Н.М., Козлов М.Н., Данилович Д.А., Мойжес О.В. Роль московских очистных сооружений в самоочищении р. Москвы по азоту // Экология и промышленность России. 2007. № 3. С. 40—43.
11. Surmacz-Gorska J, Cichon A, Minksch K. Nitrogen removal from wastewater with high ammonia nitrogen concentration via shorter nitrification and denitrification // Water Sci. Technol. 1997. N 36. V. 10. P. 71—78.
12. Kibret Mulugeta, Somitsch Walter, Robra Karl-Heinz Characterization of a phenol degrading mixed population by enzyme assay // Water Res., 2000. V. 34. N 4. P. 1127—1134.
13. Tenuta M., Beauchamp E.G. Denitrification following herbicide application to a grass sward / Can. J. Soil Sci., 1996. V. 76. N 1. P. 15—22.
14. Her J.J., Huang J.S. Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitritedenitrification and carbon breakthrough // Biores. Technol., 1995. V. 54. N 1. P. 45—51.
15. Casella S., Payne W.J. Potential of denitrifiers for soil environment protection // FEMS Microbiol. Lett., 1996. V. 140. N 1. P. 1—8.
16. Zhou G.M. & Fang H.H.P. Anoxic treatment of low-strength waste-water by immobilized sludge // Wat. Sci. Technol., 1997. V. 36. N 12. P. 135—141.
17. Liu S.M., Jones W.J., Rogers J.E. Influence of redox potential on the anaerobic biotransformation of N-heterocyclic compounds in anoxic freshwater sediments // Abstr. Gen. Meet. Am. Soc. Microbiol., 1993. V. 93. P. 368.
18. Санданова Т.В., Соктоев С.А., Намсараев Б.Б., Цыренов В.Ж. Влияние залповых сбросов нефтепродуктов на микробиоценозы и функциональную активность биологического ила очистных сооружений // Прикладная биохимия и микробиология. 2000. Т. 36. № 5. С. 559—563.

Сведения об авторах:

Щеголькова Наталья Михайловна, д. б. н., главный специалист Инженерно-технологического центра МГУП «Мосводоканал», NShegolkova@mail.ru;

Шапкина Полина Сергеевна, инженер Инженерно-технологического центра МГУП «Мосводоканал», аспирант Московского областного государственного университета, polinkamar@mail.ru.