

УДК 574.587(285.2):579

А. Н. Дзюбан

**МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ДЕСТРУКЦИИ
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОСАДКАХ
ТЕХНОГЕННЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Выявлены особенности деструкции органического вещества в донных осадках техногенных водных объектов. Показано, что распад $C_{орг}$ в них происходит преимущественно анаэробным путем при значительном участии процессов метаногенеза и сульфатредукции.

Ключевые слова: деструкция, техногенные водоемы, донные осадки.

Бактериальное население донных отложений (ДО) водоемов играет важную роль не только в круговороте органического вещества (ОВ), но также в процессах самоочищения, поскольку в отложениях микробной деструкции подвергаются как природные трудноминерализуемые вещества, так и токсичные для других гидробионтов соединения, поступающие с бытовыми и хозяйственными отходами [13]. Показано, что с увеличением антропогенной нагрузки на водные экосистемы интенсивность и направленность микробиологических потоков распада ОВ в грунтах изменяется в сторону увеличения роли анаэробных процессов [9]. Последнее, в зависимости от уровня и характера загрязнений, может привести к серьезным негативным последствиям для водоемов, однако исследования подобных ситуаций пока единичны [8, 11].

В этой связи большой интерес представляет изучение микробиологических процессов деструкции ОВ в осадках техногенных водных объектов (ТВО), сведения о которых практически отсутствуют.

Материал и методика исследований. Работы проводились в летне-осенние периоды 1991—2005 гг. на ряде техногенных водных объектов РФ, донные осадки которых насыщены различными промышленными отходами, токсичными для большинства гидробионтов [7, 9, 10, 16]. Это: 1 — водоем-накопитель Амурского целлюлозно-бумажного комбината (АЦБК) в нижнем течении р. Амур; 2 — реки Серовка и Ягорба в промышленной зоне г. Череповца (Вологодская обл.) на северном берегу Рыбинского водохранилища; 3 — отстойник Костромской ГРЭС (КГРЭС) на правом берегу Горьковского водохранилища ниже г. Костромы (табл. 1).

© Дзюбан А. Н., 2011

1. Морфометрическая характеристика техногенных водных объектов

Водные объекты	Площадь, км ²	Глубина, м (макс.)
Водоем-накопитель АЦБК	1,2—7,2	9—16
Устье р. Серовки	< 0,001	< 0,5
Участок р. Ягорбы у ФМК*	~ 0,005	2,8
Отстойник техногенных сбросов КГРЭС	0,05	3,5

* ФМК — фанерно-мебельный комбинат.

Осадки отбирали коробчатым дночерпателем, позволяющим сохранять их структуру, из которого по описанной ранее схеме заполняли экспериментальные сосуды, а часть проб фиксировали для химического анализа [3, 4]. Окислительно-восстановительный потенциал среды Eh и величину pH измеряли иономером Radelkis, концентрацию растворенного O₂ — оксиметром КЛ-115, содержание органического углерода (C_{орг}) — на газохроматографическом анализаторе CNH-1. Легкогидролизуемые фракции органического вещества (C_{лг}) выделяли обработкой пробы 5%-ной H₂SO₄. Содержание в воде и ДО метана определяли на хроматографе Chrom-5 с пламенно-ионизационным детектором при условиях: длина колонок — 2,4 м, сорбент — Porapak-Q, газ-носитель — гелий, температура термостата — 37°C. Валовую величину общей, аэробной и анаэробной деструкции ОВ рассчитывали по интенсивности поглощения ими O₂ и выделения CO₂ в герметичных стратометрических трубках с иловым монолитом и придонной водой [3, 13]. Величину ХПК поверхностным слоем илов учитывали в опытах с сулемой [3]. Интенсивность образования и потребления метана в ДО определяли газохроматографическим методом в стратометрических флаконах, используя ингибиторы [17], по разности его концентраций между контролем и опытом [5, 12]. Скорость бактериальной сульфатредукции измеряли радиоизотопным методом, используя ³⁵S-сульфат и оценивая активность бактериальных препаратов с помощью сцинтилляционного счетчика Mark-2 [12].

Результаты исследований и их обсуждение

Обследованные водные объекты существенно различались по многим морфологическим и технологическим характеристикам. Однако для всех ТВО присуще весьма важное общее свойство — накопление в донных осадках трудноминерализуемых отходов производства (в том числе токсичных), среди которых имеются различные восстановленные соединения. Последнее ведет к резкому снижению окислительно-восстановительного потенциала (Red/Ox) в среде, влияющего на структуру и функционирование бактериоценозов.

Водоем-накопитель переработанных сточных вод АЦБК в г. Амурске (Хабаровский край) представляет собой специфическую озерную экосистему. Исследования, проведенные в период 26.09—23.10.1991 г., показали, что в условиях гомотермии водные массы водоема-накопителя по физико-химическим критериям достаточно однородны. Имея высокие показатели цвет-

2. Физико-химическая характеристика донных осадков различных техногенных водных объектов (в слое 0—2 см)

Водные объекты и участки	Внешний вид грунтов	Eh, мВ	$C_{\text{орг}}$, г/дм ³	$C_{\text{ЛГ}}$, % $C_{\text{орг}}$	CH_4 , мл/дм ³
Накопитель АЦБК					
центр 1	Черный газирующий ил	–90	23	10	110
центр 2	Черный плотный ил	–100	21	6	26
прибрежье	Черный газирующий ил	–90	28	10	133
Устье р. Серовки	Черная вязкая масса	–90	63	6	10,1
Река Ягорба у ФМК	Грубодетритный газирующий ил	–5	54	8	156
Отстойник ГРЭС					
1	Серый детритный ил	20	16	22	55
2	Черный ил	–90	12	17	4,5

ности (~ 500° хромово-кобальтовой шкалы) и обеспеченности $C_{\text{орг}}$ (~ 700 мг С/л), они по всей глубине содержали метан (2,7—4,5 мл/л), а концентрация O_2 лишь у самой поверхности составляла 1,3—1,5 мг/л [7].

Дно водоема-накопителя покрыто глубоко восстановленными грубодетритными осадками, богатыми $C_{\text{орг}}$. В непосредственной близости от коллектора они жидкие и газирующие, у другого берега — плотные. В «молодых», газирующих илах доля $C_{\text{усв}}$ вдвое выше, чем в «старых» плотных. Концентрация в осадках сульфатов повсюду очень высока [7], особенно в «старых» отложениях, где она достигала 680 мг SO_4^{2-} /дм³ (табл. 2).

Специфические свойства осадков обусловили формирование в них преимущественно анаэробного бактериобентосного сообщества [7]. При этом неоднородность ДО на отдельных участках водоема-накопителя отразилась как на составе доминирующих микробных групп, так и на функционировании бактериоценозов.

На основной площади дна водоема-накопителя деструкция ОВ протекала исключительно анаэробным путем (табл. 3). В богатых $C_{\text{усв}}$ газирующих илах, где, по нашим данным, преобладали анаэробные сапрофиты и метаногены [7], интенсивность микробных процессов метаногенеза достигала уровня гипертрофных озер [6] и являлась основным терминальным звеном анаэробного распада ОВ. В «старых» же осадках удаленной от поступления сточных вод зоны, где содержание сульфатов было максимальным и где доминировали сульфатвосстанавливающие бактерии [7], основная роль в распаде ОВ принадлежала уже сульфатредукции, достигавшей 24 мг S/дм³·сут (см. табл. 3).

Река Ягорба и ее приток р. Серовка, расположенные в промышленной зоне г. Череповца, испытывают очень сильное антропогенное воздействие

3. Интенсивность процессов деструкции ОВ в поверхностных слоях донных осадков различных ТВО

Водные объекты и участки	$\Delta_{\text{аэр}}$	$\Delta_{\text{ан}}$	МГ, 0—2 см	ОМ, 0—1 см	СР, 0—2 см
	г С/(м ² ·сут)				
Накопитель АЦБК					
центр 1	0	0,14	41	0	6,7
центр 2	0	0,18	5,6	0	24
прибрежье	0,05	0,22	40	0	2,9
Устье р. Серовки	0,04	0,12	16	0,5	62*
Река Ягорба у ФМК	0,17	0,14	24	6,9	0,07
Отстойник КГРЭС					
1	0,22	0,18	5,6	2,2	0,21
2	0,05	0,34	0,5	—	3,5

П р и м е ч а н и е. $\Delta_{\text{аэр}}$ — аэробная минерализация; $\Delta_{\text{ан}}$ — анаэробный распад по выделению CO₂; МГ — метаногенез; ОМ — окисление СН₄; СР — сульфатредукция; * по данным [14].

[8, 14], однако источник и состав поступающих в каждую из них загрязнений весьма различны.

Небольшая мелководная р. Серовка служит сбросным коллектором разнообразных отходов Череповецкого металлургического комбината, среди которых имеются как соединения технического производства, в том числе битумоиды и нефтепродукты, так и лабильные ОВ. Ее осадки представляют собой черную массу с резким запахом, где концентрация сульфатов достигала 100—900 мг SO₄⁻²/дм³ [14], а содержание общего C_{орг} — 64 мг С/дм³ (см. табл. 2), что намного выше, чем в илах продуктивных водоемов [6].

Благодаря перемешиванию вод и малой глубине реки концентрация O₂ у дна в период открытой воды не падала ниже 2,5—4 мг/л, однако Red/Ox осадков даже в самом поверхностном слое был весьма низок (см. табл. 2). Последнее, в сочетании с особенностями состава органического комплекса, благоприятствует функционированию в них анаэробного бактериоценоза, и распад ОВ в осадках р. Серовки шел в основном анаэробным путем. При достаточно энергичном метаногенезе преобладали процессы сульфатредукции (см. табл. 3), которые имеют энергетическое преимущество (при доступности сульфатов) в конкуренции за лабильные ОВ.

На р. Ягорбе был обследован участок сброса стоков фанерно-мебельного комбината, привносящих фенолы, смолы и большое количество древесных отходов. Благодаря перемешиванию вод содержание O₂ у дна составляло в период наблюдений 4—5 мг/л, но уже поверхностные слои грубодетритной массы осадков обладали восстановленными свойствами (см. табл. 2). Сочетание условий — обеспеченность C_{орг}, приток O₂ и низкий Red/Ox — способствовало активному функционированию в ДО всего сложного микробного

сообщества. Деструкция ОВ протекала здесь за счет как аэробных, так и анаэробных процессов. Причем особая роль в них принадлежала отдельным звеньям цикла метана, интенсивность же сульфатредукции оказалась очень низкой (см. табл. 3).

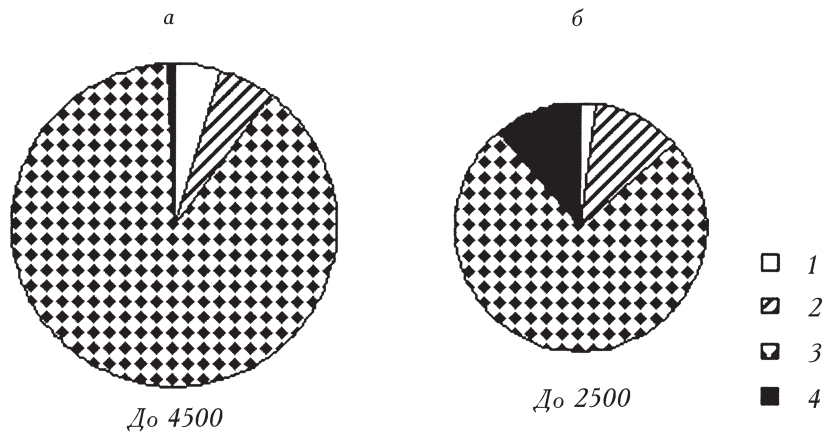
Отстойник Костромской ГРЭС, принимающий разнокачественные отходы, имеет зоны с различными характеристиками грунтов [10]. На участке влияния бытовых сточных вод сформировались богатые $C_{\text{усв}}$ и насыщенные метаном илы, поверхностные слои которых обладают слабоокисленными свойствами. В зоне массивованного поступления техногенных отходов, содержащих нефтепродукты, кислоты, сульфаты, находятся черные восстановленные отложения (см. табл. 2), где концентрация сульфат-ионов составляла 25—80 мг $\text{SO}_4^{-2}/\text{дм}^3$. Исследования интенсивности микробной деструкции на этих участках выявили существенные различия. На первом из них активно протекали как аэробные, так и анаэробные процессы утилизации ОВ с преобладанием метаногенеза. На втором — распад органического вещества осуществлялся только анаэробным бактериальным сообществом, и здесь преобладали процессы сульфатредукции (см. табл. 3).

При традиционной оценке общей деструкции ОВ в илах по выделению ими CO_2 происходит занижение результатов из-за реассимиляции метаболической углекислоты другими группами бактерий [5]. Для более полного представления о масштабах деструкции и о соотношении отдельных ее звеньев в осадках ТВО были выполнены расчеты расхода $C_{\text{орг}}$ при метаногенезе и сульфатредукции. Они велись с использованием стехиометрических уравнений [2, 15] по имеющимся экспериментальным данным. Поскольку реассимиляция CO_2 за счет метаногенеза идет лишь при автотрофном образовании CH_4 , составляющего в большинстве водоемов половину от общего [1], в окончательные расчеты деструкции ОВ добавлялось 50% от величины расхода $C_{\text{орг}}$ на метаногенез.

Обследованные ТВО по имеющимся физико-химическим характеристикам вод и ДО можно разделить на слаботоксичные и высокотоксичные. К первым отнесены: р. Ягорба у ФМК, отстойник КГРЭС (1) и зона водоема-накопителя АЦБК с «молодыми» илами, ко вторым — р. Серовка, отстойник КГРЭС (2) и зона водоема-накопителя АЦБК со «старыми» илами [7, 9]. Во всех из них шел мощный анаэробный распад ОВ с доминированием метаногенеза — до 76—84%. Однако в осадках высокотоксичных ТВО, богатых сульфатсодержащими отходами, регистрировалась весьма интенсивная сульфатредукция, составляющая 11—15% суммарной иловой деструкции (рисунок).

Заключение

Таким образом, структура бактериальных сообществ донных осадков техногенных водных объектов весьма отличается от иловых сообществ других водоемов, в первую очередь высокой численностью анаэробов — метаногенов и сульфатредукторов. Такая структура бактериобентоса ТВО и особенности его функционирования обусловлены составом органического комплекса ДО и Red/Ox-условиями. В результате распад органических соединений идет здесь



Соотношение потоков деструкции органического вещества в осадках техногенных водных объектов разного уровня токсичности (а — слаботоксичные, б — высокотоксичные), мг С/(м²·сут): 1 — аэробная деструкция; 2 — анаэробная деструкция (по СО₂); 3 — метаногенез; 4 — сульфатредукция. Цифры внизу диаграмм — средняя величина общей деструкции ОВ.

практически исключительно за счет анаэробных процессов, а в осадках ТВО накапливаются токсичные продукты микробного метаболизма.

**

Виявлено особливості деструкції органічної речовини в донних осадах техногенних водних об'єктів. Показано, що розпад С_{орг} в них відбувається здебільшого анаэробним шляхом за значної участі процесів метаногенезу та сульфатредукції.

**

Patterns of organic substance destruction in bottom sediments of artificial water objects have been distinguished. It is shown that C_{org} decay occurs anaerobically and is associated with processes of methanogenesis and sulphate reduction.

**

1. Беляев С.С., Лебедев В.С., Лауринавичус К.С. Современное микробиологическое образование метана в пресных озерах Марийской АССР // Геохимия. — 1979. — № 6. — С. 933—940.
2. Беляев С.С., Леин А.Ю., Иванов М.В. Роль метанообразующих и сульфатредуцирующих бактерий в процессах деструкции органического вещества // Там же. — 1981. — № 3. — С. 437—445.
3. Дзюбан А.Н. Определение деструкции органического вещества в донных отложениях водоемов // Гидробиол. журн. — 1987. — Т. 23, № 2. — С. 30—35.
4. Дзюбан А.Н. Влияние р. Трубезж на микробиологические процессы в оз. Плещеево // Факторы и процессы эвтрофикации озера Плещеево. — Ярославль: Изд-во Ярослав. ун-та, 1992. — С. 144—161.

5. Дзюбан А.Н. Микробиологические процессы круговорота органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада // Вод. ресурсы. — 1999. — Т. 26, № 4. — С. 262—271.
6. Дзюбан А.Н. Интенсивность микробиологических процессов круговорота метана в разнотипных озерах Прибалтики // Микробиология. — 2002. — Т. 71, № 1. — С. 111—118.
7. Дзюбан А.Н. Бактериопланктон и бактериобентос некоторых припойменных озер низовья реки Амур // Там же. — № 4. — С. 550—557.
8. Дзюбан А.Н. Бактериобентос водохранилищ Верхней Волги как показатель экологического состояния водоемов // Вод. ресурсы. — 2003. — Т. 30, № 6. — С. 742—749.
9. Дзюбан А.Н. Микробиологическая характеристика донных отложений Верхней Волги в условиях антропогенного воздействия // Биология внутр. вод. — 2006. — № 1. — С. 16—23.
10. Дзюбан А.Н., Косолапов Д.Б., Кузнецова И.А. Микробиологические процессы в Горьковском водохранилище // Вод. ресурсы. — 2001. — Т. 28, № 1. — С. 47—57.
11. Дзюбан А.Н., Косолапов Д.Б., Кузнецова И.А. Микробиологические процессы в донных отложениях Рыбинского водохранилища и оз. Плещеево как фактор формирования качества водной среды // Гидробиол. журн. — 2005. — Т. 41, № 4. — С. 82—87.
12. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. — М.: Наука, 1989. — 286 с.
13. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. — Л.: Наука, 1985. — 295 с.
14. Романенко В.И., Захарова Л.И., Романенко В.А. и др. Оценка качества воды по микробиологическим показателям в Рыбинском водохранилище у г. Череповца // Влияние стоков ЧПУ на экологическое состояние Рыбинского водохранилища. — Рыбинск, 1990. — С. 24—41.
15. Adams D.D., van Eck G.Th. Biogeochemical cycling of organic carbon in the sediments of the Grote Rug reservoir // Arch. Hydrobiol. Ergebn. Limnol. — 1988. — Vol. 31. — S. 319—330.
16. Dzyuban A., Kopylov A., Kosolapov D. et al. Effect of industrial-sanitary savage on benthic microbial communities in the Upper Volga (Russia) // Partnerships for the Environment: Science, Education and Policy. SETAC 17th Annu. Meeting, 17—21 Nov. 1996. — Washington: SETAC, 1996. — P. 303—304.
17. Topp E., Knowles R. Nitrapyrin inhibits the obligate methylotrophs *Methylosinus trichosporium* and *Methylococcus capsulatus*// FEMS Microbiol. Letters. — 1982. — Vol. 14, N 1. — P. 47—49.