

УДК 579.68

А. Н. Дзюбан

**ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОЕМОВ В
ПОДЛЕДНЫЙ ПЕРИОД**

Исследования, проведенные на разнотипных водоемах в январе — марте, показали, что деструкция органического вещества идет в это время на 68—97% за счет микробных процессов в донных отложениях. В илах продуктивных озер деструкция происходит исключительно анаэробным путем.

Ключевые слова: деструкция, донные отложения, подледный период.

Распад органического вещества (ОВ) в донных отложениях (ДО) является для пресноводных озер и водохранилищ одним из важнейших звеньев круговорота углерода [6, 10], однако подавляющая часть научных данных по циклу $C_{орг}$ в водоемах умеренных и северных широт относится лишь к вегетационному периоду. Опубликованные материалы зимних исследований по подобной теме единичны, но они свидетельствуют о существенной значимости иловой деструкции для экосистем и в это время [5, 7].

Цель настоящей работы — оценить интенсивность и выявить особенности протекающих в подледный период микробных процессов деструкции ОВ в отложениях и их зависимость от экологических условий в разнотипных водоемах.

Материал и методика исследований. Деструкционную активность зимнего бактериобентоса изучали в 1987—2007 гг. на группе озер различной морфометрии, уровня трофии и загрязненности, расположенных в Ярославской, Вологодской, Тверской областях РФ, в Латвии, а также на ряде участков Рыбинского водохранилища (табл. 1).

Исследования проводили в период с января до начала марта со льда в центральной или наиболее глубоководной части водоемов. На оз. Плещеево и Рыбинском водохранилище изучали также литоральные участки с глубиной около 1 м. В озере — это зона, зарастающая воздушно-водными макрофитами, в водохранилище — «защищенное» побережье, отделенное от открытой части островами, где летом вегетирует погруженная растительность.

© Дзюбан А. Н., 2012

1. Общая характеристика обследованных водоемов

Водоемы	Расположение	S, км ²	h, максима- льная, м	Уровень тро- фии	Загрязнен- ность на стан- циях
Рыбинское водохранили- ще	Ярославская область	4550	30 (8—16)	Мезотроф- ный	Слабая — умеренная
Оз. Плещее- во	Там же	51,4	25	Мезотроф- ный	То же
Парковый пруд в пос. Борок	Там же	< 0,01	2,5	Олиго-ме- зотрофный	Умеренная
Оз. Ферапон- тово	Вологодская область	1,5	15	Хтонио-ев- трофный	Слабая
Оз. Сивер- ское	Там же	9,6	18	Олиго-ме- зотрофный	Умеренная
Оз. Доткас	Латвия	0,2	3,5	Евтрофный	Сильная
Оз. Видогощь	Тверская об- ласть	0,21	16	Гипер-ев- трофный	Сильная

П р и м е ч а н и е. В скобках — глубины в центральной зоне водохранилища.

Воду для анализов отбирали плексигласовым батометром объемом 1 л, грунт — стратометром или небольшим коробчатым дночерпателем, сохраняющим структуру отложений, из которых заполняли экспериментальные сосуды, а часть проб фиксировали для химического анализа.

Окислительно-восстановительный потенциал среды в виде Eh измеряли иономером Radelkis, концентрацию растворенного O₂ — оксиметром КЛ-115. Содержание в осадках органического углерода (C_{орг}) определяли на газохроматографическом анализаторе CNH-1, выделяя лабильную фракцию ОВ (C_{лаб}) обработкой пробы 5%-ной H₂SO₄. Концентрацию в илах CH₄ измеряли на хроматографе Chrom-5 с пламенно-ионизационным детектором.

Метаногенез в грунтах (МГ) оценивали по увеличению концентрации CH₄ в экспериментах с ингибиторами [1, 11], темновую бактериальную ассимиляцию CO₂ (ТА) — радионуклидным методом с ¹⁴C-карбонатом на сцинтилляционном счетчике Mark-2 [8]. Интенсивность микробных процессов аэробной и анаэробной деструкции (Δ) ОВ в отложениях определяли по поглощению ими O₂ и выделению CO₂ в стратометрических трубках с иловым монолитом и придонной водой [8, 9]. Величину полной валовой Δ оценивали с учетом МГ и ТА по описанной схеме [1]. Деструкцию в воде (Δ_в) рассчитывали, используя данные ТА в воде, по эмпирическому соотношению — Δ_в = ТА×0,13 [10].

Общее количество бактерий (ОКБ) подсчитывали эритрозиновым методом на мембранных фильтрах с размером пор 0,2 мкм под микроскопом Ektaval при увеличении 10×100. Аэробные сапрофитные бактерии (АСБ) выра-

щивали в чашках Петри на агаризованной среде с рыбным экстрактом, анаэробные маслянокислые бактерии (МКБ) — методом предельных разведений на углеводной среде с восстановителем [4, 8].

Результаты исследований и их обсуждение

Обследованные водоемы весьма различаются по ряду типологических и экологических характеристик (см. табл. 1). Некоторые из них — кислородный режим, продуктивность и уровень загрязнения — оказывают особое влияние на формирование в ДО условий, благоприятствующих развитию различных бактериоценозов и физиологических групп микроорганизмов.

В подледный период концентрация O_2 у дна даже на проточных участках Рыбинского водохранилища оказалось пониженной, а в большинстве озер к концу зимы образовался анаэробный гипolimнион (табл. 2). Это обусловило в них восстановленность отложений (судя по значениям Eh), особенно в богатых лабильным ОВ илах высокотрофных и загрязняемых озер. Причем Red/Ох-потенциал в ДО на протяжении зимнего периода снижался, что отмечено при повторных исследованиях оз. Доткас и литорали водохранилища (см. табл. 2). Правда, в грунтах последнего отрицательные значения Eh регистрировались лишь в подповерхностных (1—3 см) слоях.

Другой важнейший фактор функционирования бактерий — запас общего ОВ и его доступность. По валовому содержанию $C_{орг}$ однотипные отложения всех водоемов различались незначительно — в глубоководных зонах его концентрация составляла 16—28 мг С /см³ с максимумом в торфянистых ДО, а в литоральных — была в 2—3 раза ниже. Однако обеспеченность озерных илов $C_{лаб}$ значительно выше, чем водохранилищных, и достигает в высокопродуктивных и загрязняемых органическими отходами озерах 28% от $C_{орг}$ (см. табл. 2). В то время как грунты водохранилища, обогащенные природными и техногенными аллохтонными соединениями [2], содержат лишь 10—18% $C_{лаб}$ от общего.

Количество, состав и активность зимнего бактериобентоса в обследованных водоемах сильно различались в зависимости от экологических условий в ДО. Колебания численности и соотношения массовых групп микробных ценозов — АСБ и облигатно анаэробных МКБ отражают особенности этих условий. В глубоко восстановленных и богатых $C_{лаб}$ илах наиболее продуктивных озер МКБ не только доминируют, но достигают численности, сопоставимой с летними величинами [4]. В ДО остальных озер и водохранилища, где самые поверхностные слои слабоокислены, а более глубокие уже восстановлены, преобладание анаэробов МКБ над аэробами АСБ было не столь резко выраженным (табл. 3).

Интенсивность и направленность микробных процессов распада ОВ в отложениях, как и в период открытой воды, зависели, в первую очередь, от их обеспеченности общим и лабильным ОВ, от обилия и состава бактериального населения и от Red/Ох-условий.

2. Физико-химические характеристики придонной воды и поверхностного слоя (0—3 см) донных отложений

Водоёмы и их участки	Время работ	O ₂ у дна, мг/л	Донные отложения			
			внешний вид	Eh, mV в слое 0,5/1—3 см	C _{орг} , мг/см ³	C _{лаб} , % C _{орг}
Рыбинское водохранилище						
Главный плес, гл	03.1991	5,6	Торфянистый ил	60/—	24	10
Волжский плес, гл	03.1991	4,8	Черный ил	30/—15	16	18
лит 1	01.2007	5,8	Илистый песок	65/15	8,2	12
лит 2	02.2007	3,4	То же	30/—10	—	—
лит 3	03.2007	1,5	Грубодетритный ил	10/—30	7,9	14
Озера						
Плещеево, гл	03.1987	0	Черный ил	—90/—	23	20
Там же, лит	03.1987	2,2	Грубодетритный ил	40/—20	7,3	24
Ферапонтово, гл	02.1993	0	Торфянистый ил	—	28	—
Сиверское, гл	02.1993	1,4	Черный ил	—	17	22
Доткас-1, центр	01.1987	1,8	Черный ил	10/—80	20	26
Доткас-2, центр	02.1987	0	То же	—40/—100	22	24
Видогощь, гл	01.1997	0	Грубодетритный ил	—60/—100	21	28
Пруд, центр	01.1907	4,9	Песчанистый ил	60/10	16	—

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4: гл — глубоководная зона, лит — литоральная, прочерк — отсутствие анализа.

Зимние исследования показали, что в слабоокисленных грунтах водохранилища и пруда с малой плотностью микробного населения и бедных C_{лаб}, преобладала аэробная минерализация, а в восстановленных илах продуктивных озер доминировали процессы анаэробного распада ОВ. По расчету традиционным методом (по поглощению осадками O₂ и выделению CO₂) в период наших работ аэробная деструкция составляла 5—12 мг С/(м²·сут) в водохранилище и 0—40 мг С/(м²·сут) в озерах, анаэробная — соответственно 0,1—14 и 5—220 мг С/(м²·сут). Но подобные оценки могут быть весьма зани-

3. Численность бактерий и микробные процессы деструкции ОВ в поверхностных слоях (0—3 см) донных отложений

Водоёмы и их участки	ОКБ, $\times 10^9$	АСБ, $\times 10^4$	МКБ, $\times 10^4$	Δ аэроб-	Δ ана-	МГ, мл CH_4 $\text{дм}^3/\text{сут}$	ТА, мг С
				ная	эробная		
Рыбинское водохранилище							
Главный плес, гл	1,2	7,4	11	10	10	0,06	0,2
Волжский плес, гл	1,8	22	40	12	14	0,12	0,3
Там же, лит 1	1,1	0,4	1,7	8	0,1	0,01	0,1
лит 2	0,9	—	—	8	0,1	—	—
лит 3	1,4	0,3	7,7	5	5	0,22	0,4
Озера							
Плещеево, гл	2,1	6,1	110	0	80	0,38	1,1
Там же, лит	1,6	12	80	10	50	0,22	2,0
Ферапонтово, гл	2,7	—	—	0	110	0,41	—
Сиверское, гл	2,1	—	—	20	80	0,21	—
Доткас-1, центр	4,8	16	180	40	60	0,82	3,2
Доткас-2, центр	4,7	12	210	0	120	1,68	1,4
Видогощь, гл	7,1	7,4	220	0	220	2,66	1,6
Пруд, центр	0,6	0,2	0,2	10	5	0,02	0,1

жены из-за неучета реассимиляции CO_2 , происходящей в ходе ряда микробных процессов, наиболее значимым из которых является метаногенез [1].

Образование CH_4 регистрировалось зимой во всех отложениях (см. табл. 3), и его интенсивность была в целом сопоставима с летними величинами [2]. И если в грунтах водохранилища метаногенез не превышал $0,01\text{—}0,22$ мл $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$, то в богатых ОВ илах высокопродуктивных озёр он достигал $1,7\text{—}2,7$ мл $\text{CH}_4/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$. Другой процесс, снижающий оценку выделения из ДО метаболической углекислоты, — темновая ассимиляция CO_2 . Она тоже отмечалась во всех ДО с максимумом в оз. Даткас-1 (январь) и литорали оз. Плещеево, где в пограничном слое вода — ил сохранялись микроаэробные условия, благоприятные для бактерий, окисляющих CH_4 . В грунтах водохранилища ТА была значительно ниже и наиболее активной она оказалась к концу зимы в прибрежье (см. табл. 3) при снижении концентрации O_2 у дна до $1,5$ мг/л.

Валовая деструкция ОВ в старой схеме оценивается по выделенной из илов в воду CO_2 ($\Delta_{\text{ил-1}}$), а анаэробная Δ — как разность между валовой и аэробной. Данные по МГ и ТА позволили дать более полную оценку валовой деструкции ($\Delta_{\text{ил-2}}$) и рассчитать величину полного анаэробного распада ($\Delta_{\text{ан-2}}$) при неизменной аэробной деструкции ($\Delta_{\text{аэр}}$) по уравнениям:

4. Оценка валовой иловой деструкции ($D_{ил}$) и ее роли в общеводоемном распаде **ОВ (деструкция в воде ($D_{в}$) + $D_{ил-2}$) в подледный период**

Водоемы и их участки	По старой схеме $D_{ил-1}$ мг C/(м ² ·сут)	С учетом МГ и ТА			$D_{в}$, мг C/(м ² ·сут)	$D_{ил-2}$, % от ($D_{в} + D_{ил-2}$)
		$D_{ан-2}$	$D_{ил-2}$	прибавка, %*		
Рыбинское водохранилище						
Главный плес, гл	20	14	24	20	10	71
Волжский плес, гл	26	20	32	23	15	68
Там же, лит 1	8,1	1,1	9,2	14	3	75
лит 3	10	13	18	18	3	85
Озера						
Плещеево, гл	80	105	105	31	15	88
Там же, лит	60	70	80	33	5	94
Ферапонтово, гл	110	125	125	14	20	86
Сиверское, гл	100	98	118	18	15	89
Доткас-1, центр	100	125	165	38	15	92
Доткас-2, центр	120	170	170	42	5	97
Видогощь, гл	220	350	350	59	—	—
Пруд, центр	15	6,5	16,5	10	5	77

* Увеличение $D_{ил-2}$ по сравнению с $D_{ил-1}$.

$$D_{ил-2} = D_{ил-1} + \text{расход } C/CO_2 \text{ при ТА и МГ, отсюда} \quad (1)$$

$$D_{ан-2} (\text{полная}) = D_{ил-2} - D_{аэр} \quad (2).$$

Учитывая, что автотрофный метаногенез (из H_2 и CO_2) составляет в среднем половину от общего, в уравнение (1) берется 1/2 величины МГ в углероде.

Расчеты показали, что оценки полной иловой деструкции ($D_{ил-2}$) и ее анаэробной части ($D_{ан-2}$) значительно возросли после учета реассимиляции CO_2 при МГ и ТА (табл. 4). Наиболее значимой прибавка валовой D оказалась в илах продуктивных озер, где она составила 31—59%, а сравнительно небольшой рост в оз. Ферапонтово и Сиверское связан с отсутствием данных по ТА.

Полученные данные свидетельствуют о высокой активности бактериобентоса в подледный период, особенно в илах продуктивных озер, где обилие $S_{лаб}$ и низкий Red/Ox способствуют развитию анаэробных ценозов. Кроме того в ДО с микроаэробными условиями — экологическая ниша хемотрофных CH_4 -окисляющих бактерий, которые активно потребляют CO_2 ,

— отмечалась необычно высокая ТА. В результате такой активности различных микробных групп валовая деструкция в большинстве озерных отложениях оказалась вполне сопоставима с летними данными [3]. В бедных $C_{\text{лаб}}$ грунтах водохранилища и пруда $D_{\text{ил-2}}$ была значительно ниже (см. табл. 4).

Имея характеристику полной деструкции $C_{\text{орг}}$ в донных отложениях разнотипных водоемов, интересно сопоставить эти данные с деструкцией в водной толще и оценить роль донного бактериоценоза в общем распаде ОВ во время подледного периода.

Интенсивность процессов деструкции в водной толще зимой, когда при заснеженном ледовом покрове фотосинтез фитопланктона прекращается и продуцируемые им лабильные соединения в воде отсутствуют, оказалась чрезвычайно низкой во всех водоемах и в расчете под 1 м^2 варьировала в пределах 3—20 мг С /сут. Максимальной она была в глубоководных озерах и в центральной части водохранилища, минимальной — в литорали и в оз. Доткас-2 (февраль). Однако во время январской съемки на этом мелководном озере $D_{\text{в}}$ была достаточно высокой (см. табл. 4), по-видимому, благодаря энергичному окислению выделяющегося из илов метана.

Не удивительно, что при такой низкой в целом активности бактериопланктона и достаточно энергичных процессах в отложениях, доля иловой деструкции в общем распаде ОВ оказалась зимой высокой во всех водоемах. В водохранилище и пруду она составляла 68—85%, а в продуктивных озерах достигала 86—97%. То есть основная роль в завершении круговорота углерода переходит в это время к бактериальным ценозам донных отложений.

Заключение

В подледный период с прекращением процессов фотосинтеза в водных экосистемах происходят резкие изменения соотношений деструкционных потоков — значительное возрастание роли донных микробных сообществ по сравнению с водными. Причем доля илового распада увеличивается по мере роста трофии и загрязненности водоемов, достигая максимума в мелководных озерах с восстановленными и богатыми лабильными соединениями илами — 92—97% от общей деструкции ОВ.

**

Досліди, які було проведено на різномісних водоймах у січні — березні, показали, що деструкція органічної речовини відбувається в цей час на 68—97% за рахунок мікробних процесів в донних відкладах. В мулах продуктивних озер деструкція відбувається виключно анаеробним шляхом.

**

The studies conducted in different waterbodies in January — March have shown, that 68—97% of destruction of organic matter occurs due to microbial processes in bottom sediments. In silts of productive lakes a destruction occurs only in an anaerobic manner.

**

1. Дзюбан А.Н. Микробиологические процессы круговорота органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада // Вод. ресурсы. — 1999. — Т. 26, № 4. — С. 262—271.
2. Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и процессы превращения метана в донных отложениях Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. — 2002. — № 1. — С. 35—42.
3. Дзюбан А.Н. Роль процессов цикла метана в круговороте органического вещества в озерах разного типа // Водные ресурсы. — 2003. — Т. 30, № 4. — С. 452—460.
4. Дзюбан А.Н. Маслянокислые бактерии, относящиеся к роду *Clostridium*, в донных отложениях внутренних водоемов разного типа // Микробиология. — 2005. — Т. 74, № 1. — С. 119—125.
5. Дзюбан А.Н. Сезонная динамика процессов цикла метана в донных отложениях оз. Плещеево // Гидробиол. журн. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 41—48.
6. Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. — Ярославль: Принтхаус, 2010. — 192 с.
7. Дзюбан А.Н., Косолапов Д.Б., Корнева Л.Г., И.А. Столбунова В.Н. Комплексная оценка экологического состояния мелководий Рыбинского и Горьковского водохранилищ // Биология внутр. вод. — 2007. — № 4. — С. 3—8.
8. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. — М.: Наука, — 1989. — 286 с.
9. Кузнецова И.А., Дзюбан А.Н. Определение валовой деструкции органического вещества в донных отложениях водоемов // Гидробиол. журн. — 2002. — Т. 38, № 5. — С. 94—98.
10. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. — Л.: Наука, — 1985. — 295 с.
11. Topp E., Knowles R. Nitrapyrin inhibits the obligate methylotrophs *Methylosinus trichosporium* and *Methylococcus capsulatus* // FEMS Microbiol. Lett. — 1982. — Vol. 14, N 1. — P. 47—49.