

*На правах рукописи*



Дзюбан Андрей Николаевич

**ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА  
И ЦИКЛ МЕТАНА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ  
ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ**

03 00 16 – экология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук



Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Институте биологии внутренних вод  
им И.Д. Папанина РАН

Официальные оппоненты

доктор биологических наук, профессор  
доктор биологических наук, профессор  
доктор географических наук

Горленко В М  
Бульон В В  
Мартынова М В

Ведущая организация – Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им  
Г К Скрыбина РАН

Защита состоится « 23 » октября 2007 г в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 002 064 01 при Институте Озероведения РАН по  
адресу 196105, Санкт-Петербург, ул Севастьянова, дом 9

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Озероведения  
РАН

Автореферат разослан 23 сентября 2007 г

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат военных наук

  
В Ю Цветков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Изучение круговорота вещества в водных экосистемах составляет одну из главных задач гидроэкологии (Винберг, 1967, Алимов, 2001) Познание закономерностей структурно-функциональной организации экосистем служит основой для оценки их состояния, прогноза изменений, рационального использования водных ресурсов, осуществления экологического мониторинга Формирование биологических сообществ, интенсивность и направленность процессов отдельных звеньев круговорота углерода тесно связаны в экосистеме с действием природных и антропогенных факторов Особая роль в процессах цикла органического вещества принадлежит донным отложениям

Донные отложения водоемов являются важнейшей составной частью всех водных экосистем Имеющиеся сведения по разным проблемам донных отложений показывают очень важную, но не однозначную роль донного комплекса в функционировании различных водных объектов Депонирование в отложениях биогенных соединений позволяет поддерживать высокий биопродукционный потенциал водоемов [Ohle, 1962, Россолимо, 1967], однако их избыточное накопление и выделение оказывает евтрофирующее воздействие [Kamp-Nielsen, 1974, Мартынова, 1984], сорбция аллохтонных, в том числе, токсичных веществ служит важнейшим механизмом естественного очищения вод [Rybak, 1969, Широков, 1987], в то же время, трансформация подобных седиментов анаэробным бактериальным сообществом может вызывать эффект «вторичного загрязнения» вод не менее токсичными продуктами распада [Романенко, 1985, Burton, 1991] Особое внимание уделяется изучению значимости илов в процессах круговорота органического вещества и роли в них бактериального населения [Vallentyne, 1957, Кузнецов, 1970, Дзюбан, 1987, Adams D D, Еск, 1988], а также изучению цикла метана как геохимически значимой составляющей деструкционных потоков [Беляев и др, 1981, Koyata, 1981, Кузнецов и др, 1985, King, 1992, Дзюбан, 1994] Существует проблема соотношения анаэробных и аэробных процессов деструкции органического вещества – прежде всего в илах, где плотность микробного населения на три порядка выше, чем в водной толще Однако недостаточность количественных характеристик отдельных звеньев цикла углерода в водоемах и неполнота комплексных оценок не позволяют получить ясное представление об этой глобальной проблеме

В настоящее время очевидно, что без учета микробиологических процессов деструкции органического вещества в донных отложениях и цикла метана как важнейшей ее составляющей невозможен прогресс в изучении путей и масштабов трансформации вещества и энергии в водоемах – необходимой георегической основы понимания функционирования водных экосистем для сохранения и рационального использования их ресурсов

**Цель и задачи исследования.** Цель настоящего исследования – выявление основных закономерностей микробиологических процессов деструкции органического вещества и сопряженного с ними цикла метана в донных отложениях внутренних водоемов для оценки роли илов в функционировании пресноводных экосистем. Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1 Сопоставление характеристик донных отложений как природного комплекса и среды обитания организмов, участвующих в микробиологических процессах распада органических соединений (физико-химический состав осадков, Red/Ox условия, количественные характеристики и структура бактериобентосного сообщества) для выведения общих закономерностей

2 Получение новых данных о скоростях аэробных и анаэробных процессов деструкции органического вещества в донных отложениях внутренних водоемов разного типа и уровня трофии для полной количественной оценки протекающих в них валовых деструкционных потоков

3 Определение пространственно-временных закономерностей в ходе иловых деструкционных процессов и основных экологических факторов, обуславливающих их интенсивность и направленность

4 Установление количественных характеристик растворенного метана в разнотипных донных отложениях и водных массах внутренних водоемов – концентраций, пространственного распределения, сезонной динамики

5 Получение данных о скоростях микробиологических процессов круговорота метана в донных отложениях водоемов с различными гидрологическими режимами и уровнями продуктивности, выявление основных факторов, влияющих на интенсивность этих процессов в различных условиях

6 Анализ вклада отдельных процессов цикла метана в суммарную деструкцию органического вещества в донных отложениях. Оценка выноса метана в атмосферу из водоемов

7 Выявление роли процессов деструкции органического вещества и цикла метана в донных отложениях разнотипных пресноводных водоемов в функционировании их экосистем

**Предмет защиты.** Роль аэробных и анаэробных микробиологических процессов деструкции органического вещества и цикла метана в донных отложениях в функционировании внутренних водоемов разного типа

**Положения, выносимые на защиту.**

1 Микробиологические процессы деструкции органического вещества в донных отложениях разнотипных внутренних водоемов играют важную роль в экосистемном круговороте  $C_{орг}$  в трофических связях, в «самоочищении водоемов», в формировании кислородного режима и окислительно-восстановительных условий среды

2 Анаэробные процессы деструкции органического вещества регистрируются во всех водных экосистемах и типах отложений, а в илах

высокопродуктивных водоемов – являются основными при распаде Соргсоединений

3 Микробиологические процессы цикла метана регистрируются во всех водоемах и биотопах, составляя существенную, а во многих из них основную часть анаэробного распада органического вещества

4 Интенсивность и направленность потоков деструкции органического вещества и цикла метана в донных отложениях являются важнейшим фактором функционирования водных экосистем, а количественные характеристики этих процессов могут служить критерием экологического состояния пресноводных водоемов

**Научная новизна полученных результатов.** Впервые дана полная количественная оценка потоков аэробной и анаэробной деструкции органического вещества в донных отложениях внутренних водоемов разного происхождения, миктичности, трофического статуса, географического расположения, степени антропогенного воздействия. Установлены локализация и масштабы протекающих в илах разнотипных озер и водохранилищ микробиологических процессов цикла метана и их роль в процессах разрушения органического вещества

С применением разработанных автором экспериментальных подходов и оборудования, а также усовершенствованных методов исследований впервые показано, что анаэробные процессы распада в отложениях играют важную роль во всех внутренних водоемах, а большинству из них – доминирующую. При этом в осадках продуктивных озер и водохранилищ решающий вклад в анаэробную деструкцию принадлежит процессам метаногенеза

Получены новые данные о большой значимости иловых деструкционных процессов в функционировании континентальных водных экосистем. Выявлены важнейшие экологические факторы, определяющие уровень валовой деструкции в донных отложениях, основным среди которых является обеспеченность лабильными соединениями и в целом – трофический статус водоемов. Показано, что направленность деструкционных потоков обусловлена Red/Ox условиями в грунтах и кислородным режимом водоема в целом

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Выявленные закономерности позволяют качественно и количественно оценить особую роль донных отложений в функционировании разнотипных внутренних водоемов – в круговороте органического вещества, в формировании среды обитания гидробионтов, в утилизации труднодоступных соединений и позволяют внести существенные поправки в традиционные балансовые расчеты и продукционно-деструкционные схемы

С использованием разработанных автором и усовершенствованных методических подходов стало возможным восполнить имевшиеся пробелы в трофодинамических характеристиках внутренних водоемов, глубже понять происходящие в них изменения под воздействием природных и антропогенных

факторов, выработать критерии оценки происходящих в экосистемах изменений по функциональному состоянию бактериобентоса. Полученные результаты позволяют применить эти критерии для практической оценки экологического состояния водоемов.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы в курсах лекций по экологии и гидробиологии, для оценки состояния и прогнозирования изменений функционирования водоемов в условиях загрязнения, для оценки общей биологической продуктивности водоемов.

**Апробация работы.** Результаты работы доложены на следующих научных мероприятиях: Проблемы Волги (Пермь, 1975), Проблемы экологии Прибайкалья (Иркутск, 1979), Волга-3 Биологическая продуктивность и качество воды (Тольятти, 1981), Биоценоз в природе и промышленных условиях (Пушино, 1986), Вода - донные отложения (Ереван, 1987), 300-летний юбилей отечественного флота (Переславль-Залесский, 1992), Экологические проблемы бассейнов крупных рек (Тольятти, 1993, 1998, 2000), Symposium in monitoring of water pollution (Борок, 1994), Современное экологическое состояние Верхней Волги (Ярославль, 1994), International Congress «Water Ecology and Tecnology» (Москва, 1994), Современные проблемы гидроэкологии (СПб, 1995), Съезд ВГБО (Казань, 1996), Partnerships for the Environment Science, Education and Policy (Washington, 1996), Палеоэкологические исследования пресноводных экосистем (Апатиты, 1998), Озерные экосистемы биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды (Минск, 1999), Адаптация животных и растений (на уровне организма, популяций, экосистем) к условиям арктических морей (Мурманск, 1999), 11-я Международная экологическая конференция (Петрозаводск, 1999), Проблемы гидроэкологии на рубеже веков (СПб, 2000), Малые реки Современное экологическое состояние, актуальные проблемы (Тольятти, 2001), Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга (Сыктывкар, 2001), Современные проблемы гидробиологии Сибири (Томск, 2001), Съезд ГБО РАН (Калининград, 2001), Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан (Казань, 2000, 2003), Трофические связи в водных сообществах и экосистемах (Борок, 2003), Microorganisms in Ecosystems of Lakes, Rivers and Reservoirs (Иркутск, 2003), Rational use and protection of water resources in the changing environment (Yerevan, Armenia, 2004), Первичная продукция водных экосистем (Борок, 2004), Актуальные проблемы экологии Ярославской области (Ярославль, 2005), Современные проблемы исследования водохранилищ (Пермь, 2005)

**Личный вклад автора** Диссертационная работа основана на материалах полевых исследований выполненных лично автором в комплексных экспедициях ИБВВ РАН, а также в лабораторных экспериментах за период 1975–2005 гг. Автором сформулирована проблема, поставлены задачи, разработаны оригинальные методы и подходы, проанализированы результаты исследований, сформулированы выводы и обобщения.

**Публикации** Материалы диссертации отражены в 175 научных работах, в том числе – 7 коллективных монографиях и 52 статьях в центральных российских и зарубежных журналах, а также в других рецензируемых изданиях

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 298 стр машинописного текста, состоит из введения, 7 глав, заключения, выводов и списка цитируемой литературы, который включает 553 источника, из них 294 на иностранных языках

Считаю своим долгом с теплотой и глубокой признательностью вспомнить моего учителя – д б н , чл -корр АН ССР, проф С И. Кузнецова

## **Глава 1. Состояние проблемы деструкции органического вещества и цикла метана в донных отложениях внутренних водоемов**

Проанализирована история изучения иловых отложений континентальных водоемов как важнейшего звена функционирования водных экосистем. Рассмотрены современное состояние проблемы деструкции органического вещества и цикла метана в донных отложениях, а также различные методические подходы, применявшиеся для ее решения

### **Глава 2. Материал и методы исследований**

#### **2.1. География исследований, материалы, краткое описание обследованных водоемов**

Исследования проводились на разнотипных водоемах (более 60), расположенных в различных географических и климатических зонах, которые можно разделить на 3 группы

1 – Естественные озера (около 50) различной морфометрии, типа перемешивания водных масс, химизма и уровня трофии, расположенные в Прибалтике, Карелии, Подмосковье, республике Мари-Эл, в бассейнах Верхней Волги и Северной Двины, пойме Нижнего Амура (табл 1) Донные отложения в них стабильны и имеют характерные черты, отражающие географическое положение, особенности подстилающих пород, водосбора и трофического статуса

2 – Крупные водохранилища (13) Волжского каскада, Камского каскада, Шекснинское и Цимлянское на Дону, процессы формирования донных отложений в которых не закончены [Авакян и др , 1987] Различия участков по гидрологическому режиму и уровню продукционных процессов в воде, географическое расположение, разнообразие затопленных почв обуславливают «пятнистость» водохранилищных грунтов, неоднородность их структуры и свойств [Широков, 1987]

3 – Техногенные водные объекты (ТВО). Накопитель Амурского ЦБК, р Серовка, Отстойник технологических отходов Костромской ГРЭС

Таблица 1. Общая характеристика основной части обследованных озер

Озеро	S, км <sup>2</sup>	H, м макс	*Миктичность	Уровень трофии
<i>Латвия</i>				
Дрилдас	7 4	65	Ди-м	Олиготрофный
Бригенес	1 4	45	« - »	Олиго-мезотрофный
Разнас	56	17	« - »	Мезотрофный
Ата	1 8	8	« - »	« - »
Вишки	3 6	20	« - »	« - »
Стропу	4 2	7	Голо-м	« - »
Заболотниеку	0 2	30	Ди-м	Мезо-евтрофный
Доткас	0 2	3 5	Поли-м	Евтрофный
Кивренка	0 1	2	Голо-м	Дистрофный
<i>Эстония</i>				
Тивера	0 04	6	Ди-м	Мезотрофный
Линоярв	0 03	11	« - »	Гипертрофный
Мустъярв	0 22	9	« - »	Хтонио-евтрофный
Пиккаярв	0 09	12	« - »	Дистрофный
<i>Литва</i>				
Друкшый	44 8	35	« - »	Евтрофный
<i>Карелия</i>				
Пертозеро	13 4	14	Ди-м	Олиго-мезотрофный
Вороновская ламба	0 01	13	« - »	Олиго-дистрофный
Гальозерская ламба	<0 01	4	« - »	Мезотрофный
<i>Мари-Эл</i>				
Югдем	0 03	10	Меро-м	Олиготрофный
Кононьер	0 11	23	« - »	Хтонио-мезотрофный
Куер	0 07	27	Меро-м	Мезотрофный
Черный Кичиер	0 05	8	« - »	Евтрофный
Большой Кичиер	0 48	16	« - »	« - »
Мочальер	0 02	25	« - »	Гипертрофный
<i>Бассейн Верхней Волги и Подмосковь</i>				
Белое, Вологод обл	1280	6	Голо-м	Мезотрофный
Плещеево	51 4	25	Ди-м	Мезо-евтрофный
Белое, Москов обл	0 03	12	« - »	Евтрофный
Неро	51 7	5	Поли-м	Гипертрофный
Видогощ	0 21	16	Ди-м	« - »
Лесное, Ярослав обл	<0 01	2	Голо-м	Дистрофный
<i>Северо-Двинская водная система</i>				
Сиверское	9 6	25	Ди-м	Олиго-мезотрофный
Кубенское	431	6	Голо-м	Мезотрофный
Зауломское	5 5	10	Ди-м	« - »
Покровское	1 9	4	Голо-м	Евтрофный
Кишемское		5	Голо-м	Дистрофный
<i>Пойма Нижнего Амура</i>				
Удиль	330	6	Голо-м	Мезо-евтрофный
Омми	0 9	5	« - »	Евтрофный

\*Тип перемешивания вод голо-м – голомиктический, ди-м – димиктический, поли-м – полимиктический, меро-м – меромиктический

## 2.2. Методы исследований

Изучение донных отложений, физико-химические, микробиологические и продукционные исследования водной толщи и осадков проводили методами, описанными в руководствах [Родина, 1965, Meynell, Meynell, 1965, Алекин и др., 1973, Edberg, Ностен, 1973, Nakala, 1974, Романенко, Кузнецов, 1974, Lee, Fuhrman, 1987, Кузнецов, Дубинина, 1989, Андруз и др., 1999]

Для валовой оценки распада ОВ в грунтах водоемов основным методом до сих пор является измерение скорости выделения ими в придонную воду метаболической  $\text{CO}_2$ , аэробной деструкции – потребления поверхностью илов растворенного кислорода. В настоящей работе использовался метод стратометрических трубок [Гамбарян, 1962; существенно модифицированный автором [Дзюбан, 1987а], позволяющий мобильно обследовать обширные зоны.

Для получения новых более полных и репрезентативных данных была отработана схема исследований, установлены условия опытов [Дзюбан, 1983], сконструировано экспериментальное оборудование [Дзюбан, 1989а]. Для снятия ряда химико-аналитических проблем были применены электрометрическая регистрации  $\text{O}_2$  и газохроматографический анализ  $\text{CO}_2$  [Дзюбан, 1992, Кузнецова, Дзюбан, 2002].

Ранее в расчетах деструкции исследователями не учитывались процессы реассимиляции углекислоты (РА), происходящие, в частности, при метаногенезе (МГ) и темновой ассимиляции  $\text{CO}_2$  (ТА), что ведет к значительному недоучету как общей деструкции, так и анаэробной. Поэтому по результатам исследований автором предложена новая схема более полного расчета валового распада органического вещества в донных отложениях – суммарной деструкции ( $D_{\text{сум}}$ ), а также полной анаэробной деструкции ( $D_{\text{ан-п}}$ ) [Дзюбан, 1999, Кузнецова, Дзюбан, 2002].

$$D_{\text{сум}} = D_{\text{общ}} + \text{РА (расход C/CO}_2 \text{ при ТА и МГ)}, \text{ отсюда}$$

$$D_{\text{ан-п}} (\text{полная}) = (D_{\text{общ}} + \text{РА}) - D_{\text{аэр}} \text{ или } = D_{\text{сум}} - D_{\text{аэр}}$$

## Глава 3. Общая характеристика донных отложений

Структура донных отложений и физико-химические условия в них, столь различные в разнотипных пресноводных экосистемах, во многом определяют развитие и деструкционную активность микрофлоры [Zeikus, Wmfrey, 1976, Горленко и др., 1977].

Окислительное состояние среды и обилие органического вещества напрямую влияют на ход деструкции в отложениях [Драбкова, 1971, Baynes, 1978]. В свою очередь, Red/Ох-потенциал и обеспеченность ОВ в грунтах зависят от характера перемешивания водных масс, уровня продуктивности экосистемы [Rybak, 1969], аллохтонных поступлений и варьируют в разнотипных водоемах весьма широко (табл. 4). Разнообразие донных

отложений обуславливает большую неоднородность их бактериального населения

**Таблица 2** Физико-химическая характеристика типичных донных отложений (слой 0–5 см) в летний период

Внешний вид и расположение в водоеме	Eh, мВ	C <sub>орг</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	N <sub>общ</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	CH <sub>4</sub> , мл/дм <sup>3</sup>
<i>Озера разной трофии и миктичности</i>				
Пески и глины литорали	180–60	2.8–6.2	0.1–0.2	0.1–0.3
Грунты зарастающей литорали	90–(-30)	7.8–12	0.4–1.1	1.4–2.5
Илы олиго-мезотрофных озер	120–10	9.8–15	0.4–0.8	0.3–1.1
Торфяники дистрофных озер	–	16–30	0.2–0.6	0.1–2.2
Илы хтониотрофных озер	0–(-80)	9.7–16	0.7–1.1	1.7–4.8
Илы евтрофных озер	60–(-80)	7–20	0.8–1.7	2.8–3.2
Илы гиперевтрофных озер	> -100	15–22	0.7–2.2	2.7–6.4
<i>Водохранилища с участками различного уровня загрязнений</i>				
Промытые пески	180–90	0.2–1.7	0.1–0.2	< 0.1
Загрязненные пески	100–20	2.8–7	0.2–0.9	0.1–6
Заиленные грунты	90–40	2–15	0.2–0.9	0.1–2
Осадки вблизи	60–(-20)	10–30	0.9–2.1	1–15
Грунты у бытовых сбросов	30–(-70)	15–60	1.1–3.2	10–80
<i>Техногенные водные объекты</i>				
Осадки с пятнами нефти, газифицирующие грунты	20–(-110)	> 40	0.9–4.2	20–180

#### Глава 4. Бактериальное население донных отложений

В озерах пространственное распределение бактериобентоса в пределах топологической зоны, как правило, достаточно равномерно. В литоральных грунтах, где содержание ОВ низко независимо от продуктивности водоемов, общее количество бактерий (ОКБ) минимально и в большинстве из них не превышает  $0.6–1.4 \times 10^9$  кл./см<sup>3</sup>. В илах профундальной зоны ОКБ выше, чем в литорали, и составляет летом  $1.1–7.8 \times 10^9$  кл./см<sup>3</sup>, отражая в целом уровень продуктивности озер и обеспеченности осадков доступным C<sub>орг</sub> [Дзюбан, 2000]. В таких зонах максимум бактериобентоса отмечается в газифицирующих мелкодетритных илах гиперевтрофных озер, минимум – в торфяниках дистрофных водоемов.

В водохранилищах при большой пестроте грунтов пространственное распределение бактериобентоса весьма неравномерно. Минимальная плотность бактерий отмечается в бедных C<sub>орг</sub> песках речных зон –  $0.3–0.8 \times 10^9$  кл./см<sup>3</sup>. В

илах озеровидных плесов общее количество бактерий заметно выше, чем в грунтах проточных зон [Дзюбан, 1977б, 1999] и варьирует в пределах  $0,9-5,3 \times 10^9$  кл./см<sup>3</sup>. Максимум ОКБ наблюдается на загрязняемых участках и в осадках техногенных водоемов – до  $6-9 \times 10^9$  кл./см<sup>3</sup>.

Из всего многообразия микроорганизмов, населяющих пресноводные осадки, геохимическую значимость как деструкторов ОВ имеют лишь несколько массовых групп аэробных и анаэробных бактерий [Кузнецов, 1970, Горленко и др., 1977]. Из аэробов – это так называемые сапрофитные бактерии, бактерии, окисляющие углеводороды, фенолы, клетчатку, метан, из анаэробных – маслянокислые бродильщики, метаногены, сульфатредукторы. Численность и распределение микроорганизмов в донных отложениях определяются особенностями физико-химических условий, уровнем продуктивности водоемов и, как следствие, обеспеченностью органическими веществами [Overbeck, 1968, Дзюбан, 1977б, 1983, 1999, 2004б, 2006, Bakken, Olsen, 1983].

**Таблица 3.** Численность в отложениях сапрофитных (СБ), нефтеокисляющих (НОБ), маслянокислых (МКБ), метаногенных (МГБ) и сульфатредуцирующих (СРБ) бактерий, кл./см<sup>3</sup>

Отложения на участках	СБ, $\times 10^6$	НОБ, $\times 10^3$	МКБ, $\times 10^4$	МГБ $\times 10^3$	СРБ, $\times 10^3$
<i>Озера разной трофики и миктичности</i>					
Открытая литораль	0,05–0,4	0,01–10	0,01–0,1	< 0,01	< 0,01
Зарастающая литораль	0,3–5,3	0,01–1	1–110	0,1–21	0,05–18
Илы олиго-мезотр озер	0,08–1,6	0,05–10	1–100	0,01–1,7	0,1–2,1
Торфяники	0,01–0,1	–	0,01–0,1	0,01–0,1	0
Илы продуктивных озер	0,8–17	0,1–100	0,7–200	0,1–40	0,1–50
Илы гипертрофных озер	0,3–6,7	–	100–700	10–100	1–100
<i>Водохранилища с участками различного уровня загрязнений</i>					
Промытые пески	0,01–0,1	0,1–1	0,05–0,2	0	0
Загрязненные грунты	0,05–2,0	1–110	1–22	0,01–1	0–5
Зайленные осадки	1,1–8,6	0,5–10	0,1–10	0,1–11	0,05–2,5
Вблизи городов	1,5–9,2	10–250	2–710	0,3–25	0,1–10
Грунты в зоне сбросов	0,08–9,6	25–1000	10–1100	0,7–90	2,5–150
<i>Техногенные водные объекты (ТГВО)</i>					
Осадки с пятнами нефти	0,1–2,8	25–2000	10–1700	25–100	70–480

**Глава 5. Деструкция органического вещества в донных отложениях  
разнотипных водоемов**

**5.1. Валовые оценки деструкции в отложениях озер**

**Таблица 4** Валовая деструкция органического вещества в донных отложениях озер (без учета метаногенеза) в летний период, г С/(м<sup>2</sup> сут)

Озеро	общая	аэробная	анаэробная
Дридзас	*0 12 / 0 21	0 12 / 0 11	0 / 0 1
Разнас	0 07 / 0 35	0 06 / 0 14	0 01 / 0 21
Ата	- / 0 3	- / 0 13	- / 0 17
Вишки	0 22 / 0 55	0 17 / 0 19	0 05 / 0 36
Стропу	0 09 / 0 3	0 08 / 0 14	0 01 / 0 16
Заболотнику	0 13 / 0 52	0 07 / 0	0 06 / 0 52
Доткас-1**	- / 1 19	- / 0 45	- / 0 74
Доткас-2	0 8 / 2 64	0 34 / 0	0 46 / 2 64
Кивренка	- / 0 05	- / 0 04	- / 0 01
Тивера	- / 0 82	- / 0 23	- / 0 59
Линоярв	0 4 / 1 4-2 1	0 2 / 0	0 2 / 1 4-2 1
Мустьярв	0 33 / 0 21	0 17 / 0 02	0 16 / 0 19
Пиккаярв	0 06 / 0 23	0 05 / 0 08	0 01 / 0 15
Друкшяй	0 05 / 0 8-1 1	0 05 / 0	< 0 01 / 0 8-1 1
Пертозеро	0 29 / 0 14	0 21 / 0 09	0 08 / 0 06
Вороновская ламба	- / 0 08	- / 0 02	- / 0 06
Гальзерская ламба	- / 0 16	- / 0 08	- / 0 08
Югдем	0 1 / 0 32	0 1 / 0 22	< 0 01 / 0 1
Кононъяр	0 12 / 0 1	0 09 / 0	0 03 / 0 1
Куер	0 37 / 0 21	0 19 / 0	0 18 / 0 12
Большой Кичиер	0 17 / 0 14	0 11 / 0	0 06 / 0 14
Черный Кичиер	0 18 / 0 18	0 14 / 0	0 04 / 0 18
Мочальяр	0 48 / 1 8	0 21 / 0	0 27 / 1 8
Белое, Вологод обл	0 03 / 0 14	0 03 / 0 07	0 / 0-0 07
Плещеево	0 03-0 4 / 0 2	0 03-0 16 / 0 1	0 03-0 3 / 0 15
Белое, Москов обл	0 2 / 0 16	0 17 / 0	0 12 / 0 16
Неро	0 26 / 4 2	0 13 / 0	0 13 / 4 2
Видогощ	1 2 / 2 2	0 48 / 0	0 76 / 2 2
Лесное, Ярослав обл	- / 0 06	- / 0 04	- / 0 02
Сиверское	0 04 / 0 2	0 05 / 0-0 1	0 01 / 0 16
Кубенское	0 12 / 0 15	0 12 / 0 12	0 / 0 02
Заулومское	- / 0 2	- / 0 1	- / 0 1
Покровское	- / 0 26	- / 0 17	- / 0 09
Кишемское	- / 0 17	- / 0 15	- / 0 02
Удыль	0 21 / 0 17	0 1 / 0 11	0 11 / 0 06
Омми	0 10 / 0 29	0 08 / 0 18	0 02 / 0 11

\*Числитель – данные по литорали, знаменатель – по глубоководной зоне

\*\*Полимиктическое озеро в период перемешивания (1) и стратификации (2)

В распаде органических соединений, поступающих в донные отложения, в большей или меньшей степени участвует весь разнообразный бактериоценоз илов. Однако в каждом озере и даже на разных участках условия для различных групп донной микрофлоры бывают весьма не одинаковы.

Поправки на поглощение  $O_2$  в химических реакциях, достигающее в различных отложениях озер 6–35% [Дзюбан, 1977а, 1987а], позволили выполнить корректные расчеты протекающей в них аэробной деструкции ОВ. Летом она составляет 0,02–0,48 г  $C/(m^2 \text{ сут})$ . Минимум регистрируется в бедных  $C_{орг}$  литоральных песках и торфяниках дистрофных водоемов, где преобладают лигниногумусовые фракции ОВ, максимум – в богатых  $C_{уев}$  илах высокопродуктивных голомиктических озер (табл. 4).

Анаэробная деструкция регистрируется во всех озерах и грунтах, хотя ее интенсивность значительно колеблется. Максимальной она оказалась в профундальных илах высокотрофных водоемов, где распад органических веществ протекает в период стратификации исключительно за счет деятельности анаэробных бактериальных сообществ и достигает летом 2–4 г  $C/(m^2 \text{ сут})$ . В минерализованных и аэрируемых литоральных грунтах с высоким Red/Ox, а также в торфяниках дистрофных водоемов анаэробный распад обычно невелик (табл. 4) и не превышает 0,01–0,06 г  $C/(m^2 \text{ сут})$ .

Максимальная общая иловая деструкция отмечается в водоемах двух типов, где сочетание экологических условий, определяющих активность бактериального сообщества различно. Первая группа – высокотрофные озера с богатыми  $C_{уев}$  и аноксичными илами, где регистрируется мощный, но исключительно анаэробный распад ОВ. Вторая группа – неглубокие продуктивные озера с аэрируемой водной толщью, где деструкция органического вещества идет равно энергично обоими путями. Обеспеченность легкоусвояемым автохтонным детритом, аэрация и прогрев отложений способствуют образованию и активному функционированию в этих водоемах сложного бентосного бактериоценоза. На поверхности таких илов многочисленная аэробная микрофлора интенсивно поглощает кислород и уже на глубине 1–2 см формируются благоприятные Red/Ox условия для активного функционирования анаэробных бактерий.

В профундальных илах олиготрофных и олиго-мезотрофных водоемов общая деструкция ОВ обычно в 1,5–2,5 раза ниже максимальной. Это обусловлено, в первую очередь, весьма малым запасом лабильного органического вещества, а также окислительными Red/Ox условиями, при которых потенциал анаэробного бактериального сообщества не может реализоваться полностью.

Минимальная общая деструкция отмечается в минерализованных грунтах открытых литоральных участков и в осадках дистрофных озер. Низкая активность аэробных и анаэробных бактериальных сообществ в подобных отложениях обусловлена общим недостатком  $C_{орг}$  в прибрежных песчанисто-

глинистых грунтах и перегруженностью торфяников лигнино-гумусовыми фракциями ОВ [Дзюбан, 1983]

### 5.2. Валовые оценки деструкции в отложениях водохранилищ

Водохранилища Волжско-Камского каскада и примыкающие к ним Шекснинское и Цимлянское на Дону простираются с севера на юг, охватывая своим бассейном основную часть европейской России

Таблица 5. Деструкция органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжского каскада (пределы колебаний за летние периоды)

Водохранилище	Участок	Валовая деструкция, г С/(м <sup>2</sup> сут)		
		общая	аэробная	анаэробная
Иваньковское	Реч	0 08 - 0 22	0 08 - 0 2	0 - 0 02
	Оз	0 27 - 1 1	0 13 - 0 24	0 11 - 0 8
Угличское	Реч	0 07 - 0 28	0 06 - 0 18	0 01 - 0 1
Рыбинское	Реч	0 12 - 0 22	0 08 - 0 12	0 04 - 0 1
	Оз	0 15 - 0 62	0 07 - 0 32	0 09 - 0 4
Горьковское	Реч	0 03 - 0 23	0 02 - 0 13	0 01 - 0 1
	Оз	0 2 - 0 8	0 08 - 0 4	0 11 - 0 4
Чебоксарское	Реч	0 08 - 0 34	0 08 - 0 14	0 - 0 2
	Оз	0 15 - 0 64	0 1 - 0 34	0 05 - 0 32
Куйбышевское	Реч	0 08 - 0 38	0 07 - 0 15	0 - 0 23
	Оз	0 15 - 0 53	0 1 - 0 22	0 05 - 0 31
Саратовское	Реч	0 03 - 0 11	0 03 - 0 07	0 - 0 04
	Оз	0 28 - 0 31	0 2 - 0 22	0 06 - 0 1
Волгоградское	Реч	0 02 - 0 06	0 02 - 0 06	0
	Оз	0 25 - 0 34	0 18 - 0 27	0 02 - 0 08
Камское	Реч	0 08 - 0 3	0 02 - 0 08	0 06 - 0 22
	Оз	0 06 - 0 56	0 07 - 0 16	-0 01 - 0 08
Воткинское	Реч	0 02 - 0 21	0 01 - 0 11	0 01 - 0 10
	Оз	0 10 - 0 17	0 16 - 0 19	-0 04
Нижнекамское	Реч	0 02 - 0 09	0 02 - 0 08	0 - 0 05
	Оз	0 01 - 0 6	0 02 - 0 3	0 (-0 01) - 0 3
Шекснинское	Реч	0 09	0 13	-0 04
	Оз	0 22 - 0 28	0 2 - 0 29	-0 07 - 0 05
Цимлянское	Реч	0 1 - 0 4	0 1 - 0 32	0 - 0 08
	Оз	0 56 - 0 7	0 3 - 0 4	0 3 - 0 34

Помимо географического расположения они различаются как по морфометрии, гидрологическому режиму, характеру подстилающих пород [Буторин, 1969], так и по комплексу трофических характеристик [Волга и ее , 1978]

В волжских водохранилищах масштабы аэробных процессов деструкции на основной части донного ложа близки (табл 5) и варьируют летом (с учетом ХПК) от 0 01–0 06 г С в песках до 0 25–0 3 г С/(м<sup>2</sup> сут) в илах, достигая на загрязненных участках – 0 36–0 46 г С/(м<sup>2</sup> сут)

Колебания интенсивности анаэробных процессов значительно резче В зависимости от типа отложений и Red/Ох величина  $D_{ан}$  варьирует летом от отрицательных значений (следствие неучета процессов реассимиляции CO<sub>2</sub>) до 0 8 г С/(м<sup>2</sup> сут) В целом отмечается ее снижение от Верхней Волги к Нижней Общая оценка скорости распада органического вещества (по выделяемой CO<sub>2</sub>) колеблется в волжских водохранилищах от 0 01–0 03 г С/(м<sup>2</sup> сут) в песках речных участков, бедных C<sub>орг</sub> до 0 7–1 1 г С/(м<sup>2</sup> сут) в мелкодетритных илах озеровидных плесов и черных осадках вблизи городов, насыщенных легкоголизуемыми соединениями (табл 5)

Водоемы Камы, испытывающие мощное техногенное воздействие, по ряду функциональных микробиологических и продукционных характеристик приближаются к оценкам дистрофных озер [Романенко, 1965, Дзюбан, 1999, 2003а] Что послужило причиной условно отнести их к разряду «антропогенно дистрофируемых» [Романенко, 1966, Дзюбан, 1983]

Интенсивность аэробной деструкции в грунтах камских водохранилищ, с учетом ХПК (5–53%), в целом низка (табл 5) В песчаных грунтах она составляет 0 02–0 11 г С/(м<sup>2</sup> сут), в илах основной площади донного ложа – 0 01–0 19 г С/(м<sup>2</sup> сут) Лишь в наименее загрязненных отложениях Нижнекамского водохранилища  $D_{аэр}$  достигает 0 3 г С/(м<sup>2</sup> сут)

Величина анаэробной деструкции ОВ в отложениях Камы, рассчитанной по традиционному методу, повсеместно низка, несмотря на вполне благоприятные для анаэробных бактериальных сообществ Red/Ох условия В зависимости от типа отложений  $D_{ан}$  по этим расчетам (без метаногенеза и реассимиляции CO<sub>2</sub>) варьирует от отрицательных значений в глубоко восстановленных илах до 0 3 г С/(м<sup>2</sup> сут) в слабо восстановленных отложениях Нижнекамского водохранилища Лишь в черных илах особо загрязняемого участка Камского водоема анаэробный распад достигает 0.6 г С/(м<sup>2</sup> сут) (табл 5)

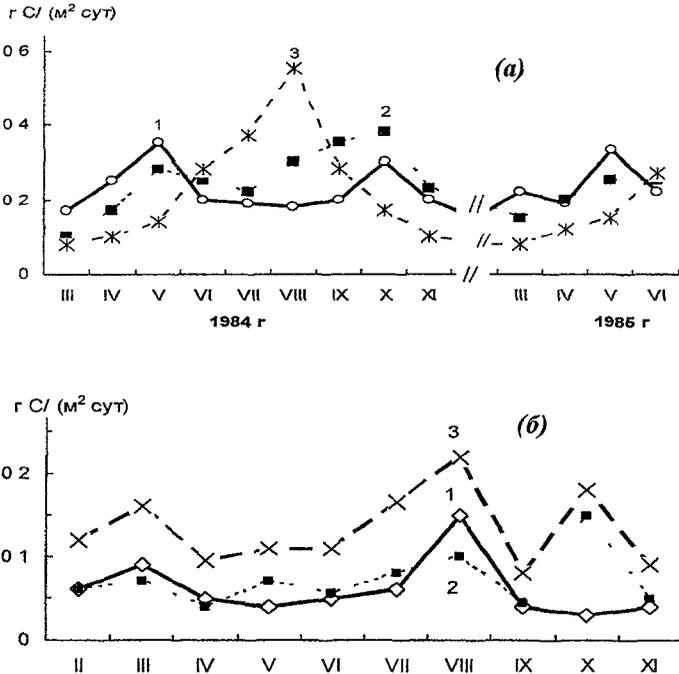
В осадках Шекснинского водохранилища подавляющая часть ОВ окисляется летом аэробным бактериальным сообществом при интенсивности 0 13–0 29 г С/(м<sup>2</sup> сут) Расчет  $D_{ан}$  нередко оказывается «отрицательным», и величина валовой общей деструкция (по CO<sub>2</sub>) невысока (табл 5)

В грунтах гиперевтрофного Цимлянского водохранилища летом деструкционные потоки сбалансированы и масштабны, а аэробная деструкция ОВ преобладает лишь в песках небольшого по площади речного участка

Микробиологические процессы в илах идут настолько энергично –  $D_{\text{общ}}$  достигает  $0.7 \text{ г C}/(\text{м}^2 \text{ сут})$ , что эффект недоучета реассимиляции  $\text{CO}_2$  не заметен (табл 5)

### 5.3. Сезонная динамика иловых процессов распада органического вещества и их роль в общеводоемной деструкции

Исследования, выполненные в годичных циклах наблюдений на мезо-евтрофном оз. Плещеево и Рыбинском водохранилище выявили динамику распада ОВ в отложениях стратифицированных и перемешиваемых водоемов. В илах профундали озера величина  $D_{\text{общ}}$  регламентируется Red/Ox, и летом, когда аэробные процессы отсутствуют,  $D_{\text{общ}}$  низка и пик деструкции отмечается осенью. В грунтах зарастающей литорали  $D_{\text{общ}}$  достигает максимума летом (рис 1а) при поступлении с детритом  $C_{\text{ув}}$ , что активизирует как аэробное, так и анаэробное бактериальные сообщества.



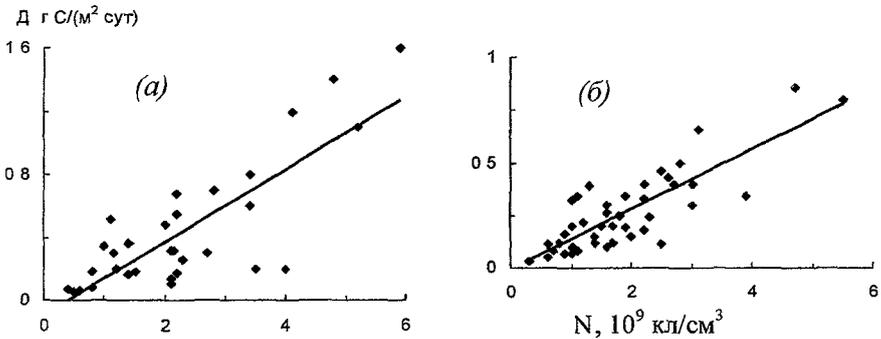
**Рис. 1** Сезонная динамика деструкции ОВ в илах оз. Плещеево (а 1 - профундаль, 2 - sublittoral, 3 - зарастающая литораль) и Рыбинского водохранилища (б 1 - аэробная, 2 - анаэробная, 3 - общая),  $\text{г C}/(\text{м}^2 \text{ сут})$

В перемешиваемом Рыбинском водохранилище сезонная динамика деструкции в грунтах иная. В илах глубоководного участка, богатых  $C_{\text{усв}}$ , максимум  $D_{\text{общ}}$  отмечен в период массового развития фитопланктона и резкой активизации аэробного бактериобентоса. Анаэробная же деструкция максимальна осенью при общем отмирании растительности (рис 1б)

Выполненные исследования позволяют оценить роль иловой деструкции в экосистемах разнотипных водоемов. За годичный цикл вклад  $D_{\text{общ}}$  (без метаногенеза) в экосистемный распад ОВ (ил+вода) составил в димиктическом озере 28%, в водохранилище – 23–27% [Дзюбан, 1983, 1989а, 2002б]

#### **5.4. Основные экологические факторы, обуславливающие интенсивность и направленность распада органического вещества в донных отложениях**

Прямой зависимости скорости распада ОВ в отложениях от температуры установить не удалось ни в лабораторных опытах [Дзюбан, 1987а], ни в ряде полевых наблюдений. Обилие общего  $C_{\text{орг}}$ , как было показано на оз. Плещеево и Рыбинском водохранилище, также не оказывает прямого влияния на ход деструкции в илах [Дзюбан, 1989, 2002б]

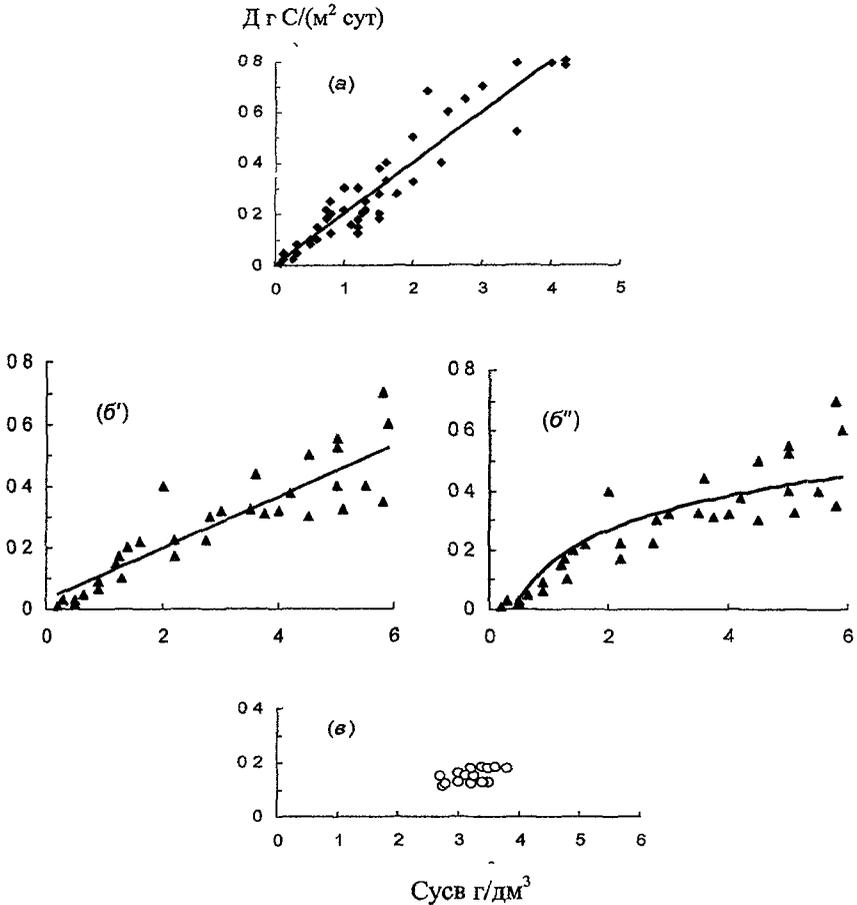


**Рис. 2.** Зависимость между интенсивностью общей деструкции ОВ ( $D$ ) в донных отложениях и численностью бактериобентоса ( $N$ ) в озерах (а) и водохранилищах (б)

Анализ обширного массива данных выявил наиболее тесную связь деструкционных процессов в отложениях с плотностью бактериобентоса (ОКБ) и с обеспеченностью лабильным ОВ. Графики зависимости величины валовой деструкции (без метаногенеза) от ОКБ в отложениях разнотипных водоемов показывает прямую связь этих характеристик. Причем в озерах, среди которых

много стратифицированных с анаэробным гипolimнионом, разброс точек достаточно велик и некоторые не принадлежат анализируемой прямой (рис 2а) В водохранилищах, где, как правило, активно и аэробное, и анаэробное сообщества грунтов, прямая зависимость анализируемых данных выглядит очень четко (рис 2б)

Графический анализ зависимости общей иловой деструкции ОВ от пула  $C_{у\text{св}}$  выявил три группы разнотипных водоемов, где эта зависимость проявляется по-разному (рис 3)



**Рис. 3.** Зависимость между интенсивностью общей деструкции ( $D$ ) в илах разнотипных водоемов и содержанием в них  $C_{у\text{св}}$  а – голомиктические озера и водохранилища, б – димиктические озера, в – меромиктические озера

1– голомиктические озера и водохранилища с аэрируемыми грунтами, где связь  $D_{обш}$  и  $C_{усв}$  линейна (рис 3а),

2– димиктические продуктивные озера, где она ближе к логарифмической (рис 3б',б''),

3– меромиктические озера, где в илах анаэробных котловин анализируемая зависимость в силу специфических экологических условий не проявляется (рис 3в)

## **Глава 6. Цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов**

### ***6.1. Содержание и распределение метана в водных объектах***

В пресноводных экосистемах метан является основным терминальным звеном анаэробной деструкции органического вещества, что обуславливает все возрастающий интерес гидроэкологов к изучению цикла  $CH_4$

Распределение  $CH_4$  в водной толще разнотипных водоемов различно [Дзюбан, 2002а, 2002в] В стратифицированных высокотрофных озерах метан мощным куполом поднимается до металимниона, а в мезотрофных – концентрируется у дна В голомиктических водоемах его распределение в воде достаточно равномерно, лишь на участках техногенных загрязнений  $CH_4$  концентрируется у поверхности В целом содержание  $CH_4$  в водах колеблется от 0,5 мкл/л до 20 мл/л, отражая уровень продуктивности водоемов или степень их загрязнения [Дзюбан, 2002а, Дзюбан и др., 2001]

Концентрация метана в поверхностных слоях донных отложений обследованных водных объектов варьирует очень широко в зависимости от их продуктивности, миктичности, физических свойств отложений, а также от внешнего воздействия [Дзюбан, 1992, 2004а] В окисленных литоральных грунтах она составляет 0,1–0,3 мл/дм<sup>3</sup>, в профундальных илах гипертрофных водоемов достигает 64–92 мл/дм<sup>3</sup> [Дзюбан, 2004б, 2006] Причем в подповерхностных слоях содержание  $CH_4$  в большинстве осадков возрастает, особенно в продуктивных голомиктических водоемах

Для водохранилищ Волжского каскада характерна географическая особенность распределения метана в грунтах – снижение его концентрации в близких по физико-химическим свойствам отложениях с севера на юг [Дзюбан, 1999]

### ***6.2. Микробиологические процессы цикла метана как звена деструкции ОБ в донных отложениях внутренних водоемов***

В анаэробных сообществах донных отложений пресноводных внутренних водоемов основную роль терминальных деструкторов выполняют метаногены [Сарпенберг, 1984, Кузнецов и др., 1985, Вак, 1988, Намсараев и др., 1994, Гальченко и др., 2001] Поэтому интенсивность образования в илах метана – одна из важнейших характеристик для полной оценки анаэробной

деструкции органического вещества, идущей в осадках этих водоемов

В озерах метаногенез (МГ) регистрируется во всех отложениях, но его скорость и локализация весьма различны. В аэрируемых грунтах суточный МГ составляет летом в слое 0-2 см 0,005-0,45 мл  $\text{CH}_4/\text{дм}^3$ , возрастая с глубиной до 1,2-6,7 мл/ $\text{дм}^3$ . В илах продуктивных стратифицированных озер с большим запасом  $\text{C}_{\text{ув}}$  скорость МГ достигает 21-106 мл/( $\text{дм}^3$  сут)

**Таблица 6.** Валовые оценки процессов продукции (ПМ) и окисления (ОМ) метана в донных отложениях разнотипных озер в летне-осенний период, а также интенсивность его выделения (ВМ) в воду

Озеро	Участок	Eh, мВ (0-2 / 2-5 см)	ПМ	ОМ	ВМ	$\text{C}_{\text{орг}}$ на ПМ	$\text{O}_2$ на ОМ
			мл $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$			мг С ( $\text{O}_2$ )/ ( $\text{м}^2 \text{сут}$ )	
Дридзас	Лит	180 / 20	45	36	-	84	110
	Пр	120 / 60	30	23	3	56	70
Стропу	Лит	180 / -	10	9	-	20	27
	Пр	55 / 0	80	60	17	145	180
Удыль	Лит	80 / 60	20	15	-	38	45
	Пр	40 / -20	290	30	-	540	90
Вишки	Лит	90 / -30	480	130	35	890	390
	Пр	80 / 10	110	65	7	200	195
Тивера	«-»	60 / -10	210	60	80	390	180
Лесное	«-»	-	7	3	-	10	10
Мустъярв	Лит	-	160	55	100	300	165
	Пр	-	120	0	115	230	0
Плещеево	Лит	80 / -10	140	120	60	260	360
	Пр	40 / -60	390	0	185	720	0
Доткас 1*	«-»	10 / -60	410	90	220	765	270
Доткас 2	Лит	40 / -20	350	110	-	650	320
	Пр	-60 / -115	970	0	820	1800	0
Друкшяй	Лит	60 / -110	27	10	-	50	30
	Пр	-20 / -80	780	0	390	1450	0
Видогощъ	Лит	20 / -10	480	110	250	0,89	320
	Пр	-80 / -160	1530	0	1160	2850	0
Линоярв	Лит	-	360	180	-	670	540
	Пр	-220 / -	4200	0	3400	7800	0

\*Полимиктическое озеро в период перемешивания (1) и стратификации (2)

Интенсивность метаноокисления в аэрируемых отложениях варьирует в пределах 0 01–11 2 мл/(дм<sup>3</sup> сут) В песках оз Дридзас, где МГ минимален, летом окисляется до 90% образовавшегося СН<sub>4</sub> В грубодетритных илах и в зарослях макрофитов с энергичным метанобразованием расход газа не превышает 50% В глубоко восстановленных осадках оз Друкшяй и Линоярв зафиксировано анаэробное потребление СН<sub>4</sub> – до 3 6–9 4 мл/(дм<sup>3</sup> сут) [Дзюбан, 2002а]

По результатам измерений метаногенеза на отдельных горизонтах отложений рассчитана продукция СН<sub>4</sub> на 1 м<sup>2</sup> дна Во всех озерах она оказалась минимальной в литоральных грунтах и торфяниках, максимальной – в илах гипертрофных озер (табл 6)

В профундальных илах водоемов с постоянно аэрируемой водной толщью и в литоральных грунтах продукция метана варьирует в пределах 7–480 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) и значительная его часть окисляется уже в осадках [Дзюбан, 2002а, 2003г] Если принять толщину слоя, где окислительные процессы имеют место (по измерениям Eh в иловых колонках) равной 1 см, то величина ОМ составляет от 3–35 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) в дистрофных и олиго-мезотрофных озерах до 60–130 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) в высокопродуктивных водоемах (табл 6) Выделение СН<sub>4</sub> из осадков всех озер варьирует от едва определяемых значений до 1160–3400 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут)

По стехиометрическим расчетам [Беляев и др, 1981, Adams, van Eck, 1988] расход С<sub>орг</sub> в процессах метаногенеза составляет 10–7800 мг С/(м<sup>2</sup> сут), а траты О<sub>2</sub> на окисление СН<sub>4</sub> в илах разнотипных озер колеблются в пределах 10–540 мг О<sub>2</sub>/(м<sup>2</sup> сут) (табл 6).

В водохранилищах Волжского каскада интенсивность процессов цикла СН<sub>4</sub>, в соответствии с различием физико-химических условий в грунтах, варьирует по отдельным участкам очень широко Максимальная скорость метанобразования отмечается на ряде точек Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского водохранилищ, где в восстановленных (слой 2-5 см), богатых С<sub>орг</sub> илах она достигает уровня высокотрофных озер – 5–22 мл СН<sub>4</sub>/(дм<sup>3</sup> сут) В песках проточных зон МГ не превышает 0 001-0 2 мл СН<sub>4</sub>/(дм<sup>3</sup> сут), а в остальных грунтах – около 0 5 мл/(дм<sup>3</sup> сут) с максимумом в верхневолжских водоемах и минимумом на Нижней Волге [Дзюбан, 2004а]

Окисление образовавшегося метана в грунтах волжских водохранилищ регистрируется повсеместно Его скорость составляет в большинстве проб 0 01–0 9 мл СН<sub>4</sub>/(дм<sup>3</sup> сут) На отдельных же участках каскада со специфической экологической обстановкой, которая, как правило, отмечается в зонах максимального антропогенного воздействия, метаноокисление достигает в илах 7–9 мл СН<sub>4</sub>/(дм<sup>3</sup> сут)

В водохранилищах Камского каскада донные отложения перегружены техногенными органическими соединениями [Балабанова, 1961], которые снижают Red/Ox илов уже на самой поверхности В результате – скорость

метанобразования в них оказалась максимальной для Волжско-Камской системы и соответствует уровню высокотрофных озер, достигая в подповерхностных слоях 15-22 мл  $\text{CH}_4/(\text{дм}^3 \text{сут})$  [Дзюбан, 1999, 2004а]

Окисление  $\text{CH}_4$  регистрируется во всех грунтах водохранилищ Камы, однако размах колебаний этого процесса весьма широк – 0 01–8 2 мл/(дм<sup>3</sup> сут) Выделение  $\text{CH}_4$  из осадков в водную толщу также происходит повсеместно – даже в песках проточных участков [Дзюбан, 1998, 2004а] Последнее свидетельствует об особой роли микробиологических процессов цикла метана в экосистемах водоемов, испытывающих повышенное технико-бытовое загрязнение

**Таблица 7.** Валовые оценки цикла метана в поверхностных слоях донных отложений отдельных водохранилищ (мл  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$ ) и расход в этих процессах  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{O}_2$  (летне-осенний период)

Водохранилище	ПМ	ОМ	ВМ	$\text{C}_{\text{орг}}$ на ПМ	$\text{O}_2$ на ОМ
	мл $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$			мг С ( $\text{O}_2$ )/ ( $\text{м}^2 \text{сут})$	
Иваньковское	<u>0 5–380</u> 69	<u>0 4–180</u> 23	<u>0–205</u> 48	1–710	1.2–540
Рыбинское	<u>0 2–300</u> 69	<u>0 1–95</u> 23	<u>0–205</u> 48	0 4–560	0 3–270
Горьковское	<u>2 1–255</u> 68	<u>1 0–88</u> 21	<u>3 2–162</u> 39	4–470	3–250
Чебоксарское	<u>0 4–280</u> 52	<u>0 3–80</u> 21	<u>0–150</u> 32	0 8–520	1–230
Куйбышевское	<u>0 2–124</u> 27	<u>0 1–27</u> 11	<u>0–31</u> 15	0 4–250	0 3–90
Саратовское	<u>0 2–88</u> 18	<u>0 2–19</u> 7.6	<u>0–10 1</u> 5 3	0 4–170	0 6–54
Волгоградское	<u>0 1–31</u> 10	<u>0 1–15</u> 4 2	<u>0 1–9 2</u> 4 2	0 2–59	0 3–44
Камское	<u>1 4–410</u> 145	<u>0 2–55</u> 31	<u>2 2–300</u> 140	2 6–760	0 6–170
Воткинское	<u>2 2–275</u> 138	<u>0 2–44</u> 13	<u>6 8–186</u> 91	71–410	0 6–126
Нижнекамское	<u>1 0–436</u> 169	<u>0 2–80</u> 39	<u>0–310</u> 110	1 9–830	0 6–229

Над чертой - крайние значения, под чертой - средняя

В Шекснинском водохранилище интенсивность процессов цикла  $\text{CH}_4$  в донных отложениях оказалась по сравнению с волжскими водоемами в целом небольшой. Метаногенез там не превышает летом  $0,005\text{--}0,98$  мл  $\text{CH}_4/(\text{дм}^3 \text{сут})$ , метаноокисление –  $0,005\text{--}1,28$  мл  $\text{CH}_4/(\text{дм}^3 \text{сут})$ , что соответствует Red/Ox и обеспеченности лабильными ОВ [Дзюбан, 2005б]

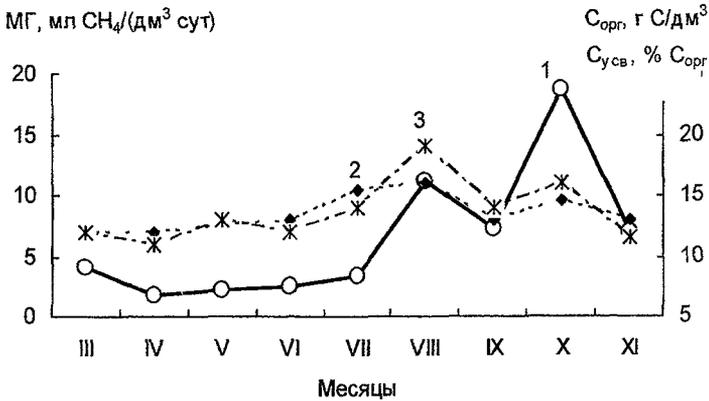
В высокопродуктивном Цимлянском водохранилище грунты весьма богаты легкодоступными соединениями, что создает в более глубоких слоях осадков с низким Eh благоприятные условия для анаэробного сообщества. Поэтому метанобразование в детритных илах при Eh = -80 достигает  $1,2$  мл  $\text{CH}_4/(\text{дм}^3 \text{сут})$ , причем весь образующийся  $\text{CH}_4$  окисляется уже в поверхностных слоях осадков [Дзюбан, 1979в]

Расчет продукции  $\text{CH}_4$  в грунтах водохранилищ показал, что минимальная ПМ свойственна пескам и глинам речных участков, максимальная – осадкам загрязняемых зон. Особенно высока ПМ в Камских загрязненных грунтах и достигает  $440$  мл/ $(\text{м}^2 \text{сут})$ . В отложениях волжских водоемов ПМ колеблется от  $0,1$  до  $380$  мл/ $(\text{м}^2 \text{сут})$ , уменьшаясь в среднем с севера на юг. Несмотря на энергичное метаноокисление поток  $\text{CH}_4$  из грунтов составляет в среднем  $4,2\text{--}110$  мл  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$  с максимумом в Камских водохранилищах и минимумом в южных Волгоградском и Саратовском. Расход  $\text{C}_{\text{орг}}$  на процессы метаногенеза в грунтах водохранилищ колеблется в пределах от  $0,2$  до  $810$  мг  $\text{C}/(\text{м}^2 \text{сут})$ . Траты  $\text{O}_2$  на окисление  $\text{CH}_4$  в тех же отложениях составляют  $0,1\text{--}310$  мг  $\text{O}_2/(\text{м}^2 \text{сут})$  (табл. 7)

### **6.3. Сезонная динамика процессов цикла метана; экологические факторы, обуславливающие интенсивность образования и окисления метана**

Изучение сезонной динамики цикла метана в отложениях димиктического мезо-евтрофного оз. Пleshеево позволило с максимальной полнотой оценить его масштабы в озерах такого типа, а также выявить характер и степень влияния на отдельные процессы важнейших экологических факторов.

Сезонные колебания интенсивности метаногенеза в илах профундали оз. Пleshеево имеют обычно два выраженных пика в конце лета в период максимальной первичной продуктивности [Дзюбан, 1989] и в середине октября при прогреве придонных вод во время осенней циркуляции. Однако прямой зависимости МГ от температуры не наблюдалось, как это отмечено и другими исследователями [Kelly, Chynoweth, 1981; Nozhevnikova et al, 1998]. Особенно близкими оказались кривые сезонной динамики МГ и лабильного ОВ (рис. 4)



**Рис. 4** Сезонные изменения метаногенеза (1), концентрации  $C_{орг}$  (2) и  $C_{усв}$ , % (3) в илах профундали оз. Плещеево

Сезонная динамика окисления метана в отложениях отдельных экотопов оз. Плещеево различна. В аэрируемых грунтах зарастающей литорали она совпадает с колебаниями концентраций  $CH_4$ , что отмечалось и в других водоемах [Devol, 1983, Schnell, King, 1995]. Но в илах профундальной зоны лимитирующим фактором процессов окисления метана является уже не его концентрация, а обеспеченность донного бактериального сообщества кислородом [Кузнецова, Дзюбан, 2001, 2005].

Графический анализ зависимости интенсивности метаногенеза от пула  $C_{усв}$  и Red/Ox в илах разнотипных водоемов показал, что с первым фактором эта зависимость проявляется достаточно четко в большинстве из них, особенно при сравнении данных подповерхностных проб (рис. 5). Связь же интенсивности метаногенеза с Red/Ox условиями оказалась наиболее выраженной в донных отложениях озер (рис. 6).

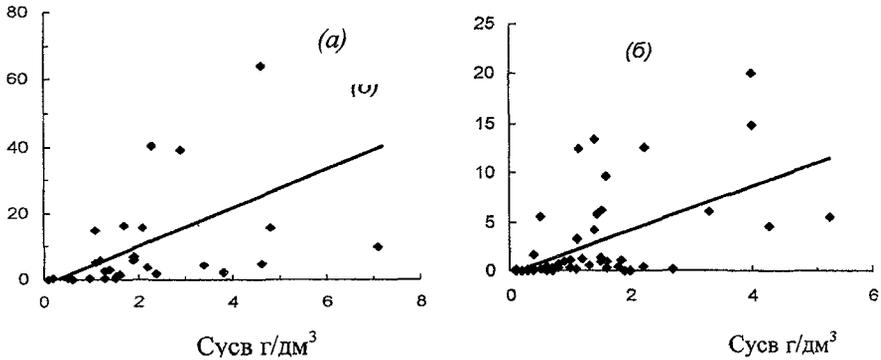


Рис 5 Зависимость между интенсивностью метаногенеза (МИ) в грунтах озер (а) и водохранилищ (б) и содержанием  $C_{\text{CH}_4}$  в слое 0–5 см

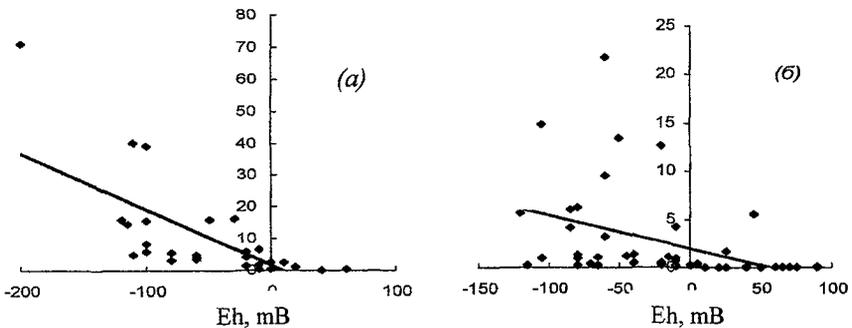


Рис. 6. Зависимость между интенсивностью метаногенеза в отложениях озер (а) водохранилищ (б) и Red/Ox условиями в них (Eh) в слое 0–5 см

#### 6.4. Вклад процессов цикла метана в суммарную иловую деструкцию органического вещества; вынос метана в атмосферу

Валовые расчеты процессов цикла метана показали их существенную значимость в иловом распаде ОВ [Дзюбан, 2002а, 2002г, 2003а] В отложениях с аэробными условиями у дна количество  $C_{\text{орг}}$ , подвергнувшегося разрушению в

процессах метаногенеза, колеблется от 9 до 41% от  $D_{\text{сум}}$ . В продуктивных озерах с анаэробной котловиной вклад ПМ в суммарную деструкцию составляет от 27–52% в литоральных грунтах до 76 % в профундальных илах (табл. 8)

**Таблица 8.** Роль иловых процессов цикла метана (ЦМ) в распаде ОВ в донных отложениях разнотипных озер в летне-осенний период

Озеро	Участок	Деструкция с учетом ЦМ, г С/(м <sup>2</sup> сут)		ПМ, % от $D_{\text{сум}}$	ОМ, % от $D_a$
		$D_{\text{сум}}$	$D_{\text{ан-п}}$		
Дридзас	Лит	0 59	0 39	13	31
	Пр	0 43	0 32	14	76
Стропу	Лит	0 22	0 03	9	36
	Пр	0 43	0 21	35	80
Удыль	Лит	0 12	0 06	33	75
	Пр	0 71	0 65	76	85
Вишки	Лит	1 93	1 40	41	72
	Пр	0 76	0 57	26	67
Тивера	«→»	0 93	0 70	42	77
Лесное	«→»	0 017	0 01	59	60
Мустьярв	Лит	0 56	0 37	53	61
	Пр	0 34	0 34	72	0
Плещеево	Лит	0 46	0 28	30	54
	Пр	0 62	0 54	48	71
Доткас 1	«→»	1 58	0 94	55	61
Доткас 2	Лит	1 92	1 18	31	71
	Пр	3 15	3 15	57	0
Друкшяй	Лит	0.11	0 04	45	50
	Пр	1 84	1 84	71	0
Видогощь	Лит	1.44	0 93	27	72
	Пр	3 2	3 2	69	0
Линойрв	Лит	1 2	0 82	52	61
	Пр	8 7	8 7	76	0

$D_{\text{сум}}$  – суммарная деструкция,  $D_{\text{ан-п}}$  – полная анаэробная деструкция

Траты  $O_2$  на окисление  $CH_4$  составляют в озерах существенную долю от аэробной иловой деструкции В голомиктических водоемах и аэрируемых участках стратифицированных продуктивных озер вклад процессов метаноокисления в  $D_{aэр}$  варьирует от 31 до 80% (табл 8)

С учетом МГ увеличивается не только суммарная иловая деструкция, но возрастает оценка полного анаэробного распада ( $D_{анп}$ ), что свидетельствует о его большой значимости в функционировании разнотипных озер

Более полный расчет деструкции в грунтах водохранилищ показал, что и в этих проточных водоемах процессы цикла метана играют весомую роль в распаде ОВ, особенно в илах озеровидных плесов В отложениях Камского каскада вклад ПМ в суммарную деструкцию достигает 28% (табл 9)

**Таблица 9.** Роль иловых процессов цикла метана (ЦМ) в распаде ОВ в донных отложениях водохранилищ Волго-Камского каскада в летне-осенний период

Водохранилище	Деструкция с учетом ЦМ, г С/(м <sup>2</sup> сут)		ПМ, % от $D_{сум}$	ОМ, % от $D_a$
	$D_{сум}$	$D_{ан-п}$		
Иваньковское	$\frac{0.4-1.5}{0.31}$	$\frac{0.35-0.51}{0.21}$	1-8	0.2-54
Рыбинское	$\frac{0.04-0.8}{0.25}$	$\frac{0.02-0.45}{0.16}$	2-10	0.2-49
Горьковское	$\frac{0.09-0.85}{0.33}$	$\frac{0.02-0.44}{0.21}$	1-4	0.5-59
Чебоксарское	$\frac{0.1-0.79}{0.28}$	$\frac{0.04-0.7}{0.14}$	1-5	0.1-36
Куйбышевское	$\frac{0.1-0.76}{0.3}$	$\frac{0.02-0.39}{0.17}$	1-13	0.3-31
Саратовское	$\frac{0.02-0.39}{0.18}$	$\frac{0.01-0.14}{0.08}$	1-5	0.1-7
Волгоградское	$\frac{0.01-0.59}{0.24}$	$\frac{0.01-0.58}{0.08}$	1-7	0.1-3
Камское	$\frac{0.02-0.58}{0.26}$	$\frac{0.01-0.44}{0.18}$	2-28	1-61
Воткинское	$\frac{0.02-0.35}{0.24}$	$\frac{0.01-0.24}{0.16}$	1-26	2-65
Нижнекамское	$\frac{0.02-0.82}{0.26}$	$\frac{0.01-0.51}{0.18}$	2-24	3-85

Исследования цикла метана с измерением его эмиссии, проведенные на ряде характерных экотопах бассейна Рыбинского водохранилища, показали, что ее величина колеблется очень широко – от отрицательных значений до 50–100 мл  $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$ . Максимальный вынос газа регистрируется в загрязняемых зонах, где при мощном метаногенезе в илах  $\text{CH}_4$  не успевает окислиться ни в грунтах, ни в воде

### **Глава 7. Роль процессов деструкции органического вещества в илах и цикла метана в функционировании экосистем внутренних водоемов**

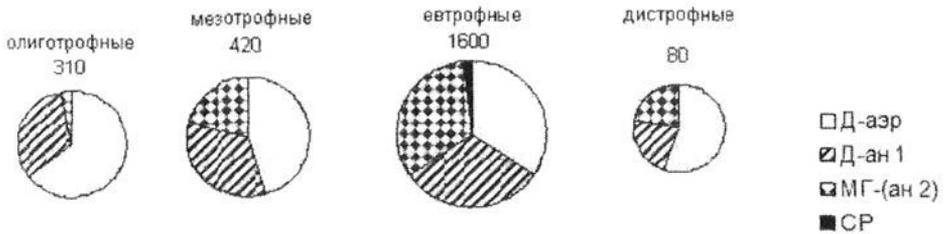
Интегральные оценки суммарной деструкции органического вещества в отложениях и расчет доли в ней отдельных значимых процессов позволили выявить характерные особенности функционирования бактериальных сообществ-деструкторов в илах различных групп внутренних водоемов

В озерах интенсивность и направленность иловых деструкционных процессов в первую очередь зависит от уровня трофии и миктичности, определяющей кислородный режим и Red/Ox профундальных зон. В осадках голомиктических водоемов, где суммарная величина деструкции в целом ниже, чем других, разрушение ОВ на 35–60% идет за счет аэробных сообществ. Причем с ростом продуктивности доля  $D_{\text{аэр}}$  в  $D_{\text{сум}}$  уменьшается, а метаногенеза – возрастает, достигая 30–40% общего распада (рис 7)

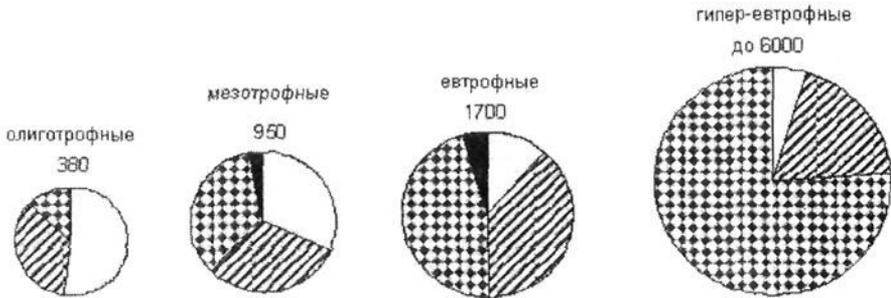
В димиктических и меромиктических озерах в целом значительно возрастает роль анаэробных процессов. И если в олиготрофных и умеренно-мезотрофных озерах аэробная минерализация в грунтах еще составляет 30–55% от  $D_{\text{сум}}$ , то в более продуктивных – не превышает 10–15%. Причем в большинстве стратифицированных водоемов в анаэробном распаде превалирует метаногенез, достигая в гипертрофных озерах 45% суммарной иловой деструкции. Значимость сульфатредукции существенна лишь в меромиктических сульфатных озерах, где она достигает 40–50% анаэробной деструкции ОВ (рис 7)

В водохранилищах, где водная толща благодаря проточности и ветровому перемешиванию постоянно аэрируется, интенсивность и направленность деструкционных процессов в грунтах зависит от обеспеченности и состава ОВ, от географического расположения водоемов и в меньшей степени – от их продуктивности. В результате глубокого изучения всех звеньев деструкции ОВ в донных отложениях, особенно метаногенеза, удалось выявить их зональные особенности и большую значимость анаэробных процессов

### Голомиктические озера



### Димиктические озера



### Меромиктические озера

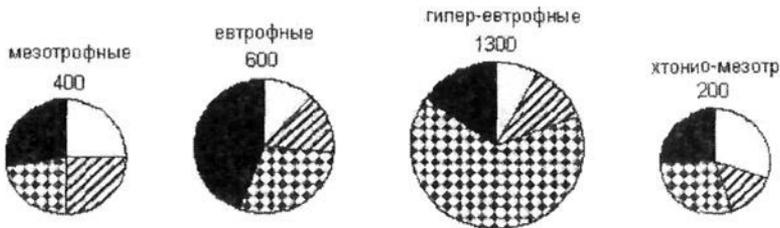
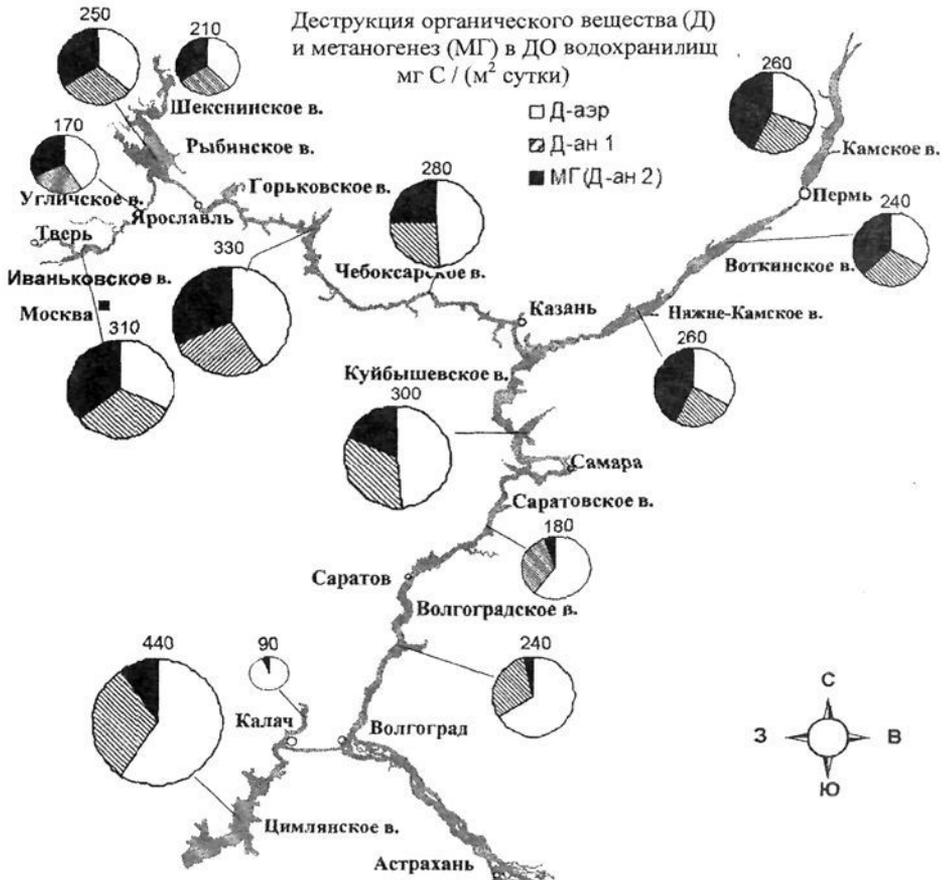


Рис. 7. Особенности соотношений аэробных и анаэробных потоков деструкции органического вещества в отложениях разнотипных озер, в среднем на все донное ложе, мг С/(м<sup>2</sup> сут). Д-аэр – аэробная деструкция, Д-ан 1 – анаэробная (по СО<sub>2</sub>), МГ (ан 2) – метаногенез, СР – сульфатредукция.



**Рис. 8.** Зональные особенности соотношений аэробных и анаэробных потоков деструкции ОВ в грунтах водохранилищ (ВВ– Верхняя Волга, СрВ– Средняя Волга, НВ– Нижняя Волга) в среднем на все донное ложе.

Д-аэр – аэробная деструкция, Д-ан 1 – анаэробная (по CO<sub>2</sub>), МГ (ан 2) – метаногенез. Цифры – суммарная деструкция ОВ

Оказалось, что в грунтах северных водохранилищ – Верхней Волги и Камы – доминируют процессы анаэробного распада, на Нижней Волге и в Цимлянском – преобладает аэробная минерализация ОВ, а на Средней Волге потоки иловой деструкции сбалансированы (рис. 8).

Причем в грунтах Камского Каскада, перегруженных аллохтонным ОВ, значимость процессов МГ в суммарной деструкции особенно велика, а в илах южных водоемов, обогащенных лабильным  $C_{орг}$ , доля метаногенеза в  $D_{сум}$  – минимальна (рис 8)

Структура бактериальных сообществ техногенных водных объектов весьма отличается от природных сообществ других водоемов (табл 3), и в первую очередь высокой численностью метаногенов и сульфатредукторов. Такая структура бактериобентоса и особенности его функционирования обусловлены составом органического комплекса и Red/Ox (табл 2) По этим характеристикам ТВО можно разделить на слаботоксичные, к которым относится часть акватории отстойника Костромской ГРЭС и часть побережья Водоема-накопителя Амурского ЦБК, и на высокотоксичные – р Серовка и «старая» часть накопителя АЦБК [Дзюбан, 2002 г, Дзюбан и др , 1998]

Во всех техногенных водоемах регистрируется мощный анаэробный распад ОВ с доминированием метаногенеза Однако в осадках высокотоксичных ТВО, богатых сульфатами, регистрируется весьма интенсивная сульфатредукция, составляющая до 15% суммарной иловой деструкции

Весомая роль иловой деструкции в цикле  $C_{орг}$  водоемов уже была показана ранее [Дзюбан, 1983] Применение новых подходов и расширение ареала исследований позволили получить более полные экологические оценки

Разнообразные ОВ, поступающие извне и синтезированные в процессах фотосинтеза, включаются во внутриводоемный цикл через бактериальное звено При этом в воде окисляются в основном лабильные автохтонные соединения, а в отложениях – частично разложившиеся и аллохтонные Для количественного сопоставления двух деструкционных потоков были сделаны расчеты на  $1 м^2$  водного зеркала и донного ложа разнотипных водоемов

В водохранилищах, водная толща которых насыщается кислородом при перемешивании, усредненная величина деструкции в воде ( $D_{вод}$ ) под  $1 м^2$  во всех водоемах превышает  $D_{сум}$  на  $1 м^2$  отложений Однако в целом доля иловых

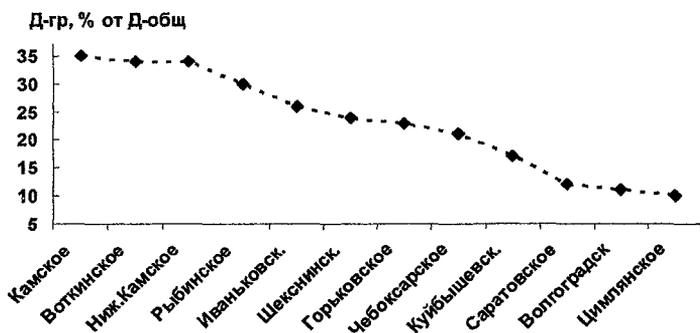


Рис 9 Динамика в водохранилищах соотношения Д-грунты/Д-общ, %.

процессов в деструкции ОВ с учетом цикла метана в водохранилищах весьма существенна – в северных водоемах она достигает 30–35% общеводоемной деструкции (вода + грунты), на Средней Волге составляет около 20%, а в южных – около 10–12% (рис 9)

В большинстве озер разной продуктивности и миктичности доля иловой деструкции в общем распаде ОВ варьирует в пределах 21–48%. Лишь в димиктических гипертрофных и мелководных дистрофных она достигает 56–60 и 74% соответственно. В первой группе – за счет мощных иловых процессов и, в первую очередь, метаногенеза, во второй – в результате очень слабой деструкции в воде, обусловленной низким фотосинтезом (табл 10)

В водохранилищах доля иловой деструкции в общем распаде ОВ зависит не столько от продуктивности, сколько от географического положения. Даже в одной трофической группе колебания этого показателя весьма велики, причем в южных водоемах роль иловых процессов в экосистеме всегда ниже, а в северных – выше, с максимумом в антропогенно дистрофируемых камских водохранилищах (табл 10)

**Таблица 10** Интегральная оценка в водоемах разного типа первичной продукции фитопланктона (ППФ) и общей деструкции ОВ в воде и илах (Д) (в скобках – вклад в Д иловых процессов, %)

Тип водоемов	ППФ	Д	Д/ ППФ
	г С/(м <sup>2</sup> сут)		
<b>Озера</b>			
Олиготрофные	0 1–0 2	0 1–0 25 (33)	1–1 25
голомиктические			
димиктические	0 2–0 4	0 5–0 7 (21)	2 1–2 8
Мезотрофные	0 3–0 6	0 4–0 8 (43)	1 1–2 1
голомиктические			
димиктические	0 3–0 9	0 6–1 8 (39)	1 6–4 1
меромиктические	0 2–0 5	0 8–1 9 (44)	2 7–4 3
Евтрофные	1 8–3 4	1 2–2 8 (48)	0 6–1 1
голо(поли)-миктические			
димиктические	1 6–2 8	1 1–2 2 (44)	0 7–1 6
меромиктические	0 7–1 2	0 8–1 1 (46)	1 2–1 4
Гипертрофные	2 8–3 7	5 9–11 (56)	2 1–2 9
димиктические			
Дистрофные	0 01–0 2	0 05–0 1 (57–74)	1 7–4 5
голо(ди)-миктические			
<b>Водохранилища</b>			
Мезотрофные	0 4–0 8	0 9–2 1 (12–28)*	2 1–3 1
Евтрофные	1 1–3 9	1 6–3 (10–25)*	1 1–1 8
Антропогенно дистрофные	0 08–0 1	0 5–0 8 (35)	6 2–8 4

\*Минимум – в южных водохранилищах, максимум – в северных

В целом общий деструкционный поток во внутренних водоемах преобладает над продукционным, но соотношение Д/ППФ в разных группах варьирует очень широко – от 0,6–1,1 в голомиктических евтрофных озерах, до 4,3–8,4 в водоемах, отложения которых перегружены трудно усвояемыми соединениями. Это – меромиктические и дистрофные озера, а в особенности – водохранилища камского каскада (табл. 10).

Обобщенная количественная оценка деструкции органического вещества и анализ ее структуры в донных отложениях внутренних водоемов разного типа, выполненные по разработанной нами схеме, позволяют понять экологическую значимость иловых процессов распада, особенности их локализации, интенсивности и направленности.

Ведущим экологическим фактором, определяющим уровень валовой деструкции ОВ в донных отложениях, является их обеспеченность лабильным органическим веществом и в целом – трофический статус водоемов. При этом в илах большинства водных систем в распаде преобладают анаэробные процессы, а направленность деструкции обусловлена Red/Ox и кислородным режимом. В анаэробной же составляющей существенную, а в продуктивных водоемах – доминирующую роль играют процессы цикла метана (табл. 11).

**Таблица 11.** Деструкция органического вещества в донных отложениях внутренних водоемов разной трофии и миктичности, г С/(м<sup>2</sup> сут), роль в распаде ОВ анаэробных процессов, %

Уровень продуктивности	Озера разной миктичности			Водоохранилища и участки
	Голо(поли)-миктические	Ди-миктические	Меро-миктические	
Олиготрофный	<u>0.31</u> 35 (10)	<u>0.38</u> 47 (38)	–	<u>0.16</u> 49 (35)
Мезотрофный	<u>0.44</u> 57 (38)	<u>0.95</u> 68 (49)	<u>0.42</u> 75 (30)	<u>0.23</u> *39(14)–64(53)
Евтрофный	<u>1.6</u> 62 (50)	<u>1.7</u> 84 (55)	<u>0.6</u> 85 (30)	<u>0.31</u> *33(13)–68(55)
Гипертрофный	<u>2.5</u> 65 (55)	<u>5-6</u> 95 (80)	<u>1.3</u> 92 (70)	<u>0.42</u> 40 (22)
Дистрофный, хтониотрофный	<u>0.08</u> 45 (50)	<u>0.45</u> 56 (60)	<u>0.2</u> 70 (45)	<u>0.25</u> 68 (62)

*Примечание.* Числитель –  $D_{\text{сум}}$ , знаменатель – доля  $D_{\text{ан-п}}$  в  $D_{\text{сум}}$ , %, в скобках – доля МГ в  $D_{\text{ан-п}}$ , % \*Минимум – в южных водоемах, максимум – в северных

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования интенсивности микробиологических процессов деструкции органического вещества и цикла метана в донных отложениях внутренних водоемов разного происхождения, миктичности и уровня продуктивности выявили важную, но различную роль этих процессов в функционировании континентальных водных экосистем. Оказалось, что доля илового распада в общеводоемном деструкционном потоке составляет в вегетационный период от 21 до 74%, а в подледный – достигает 90%. Причем, если в водной толще усваиваются в основном автохтонные лабильные соединения, то в осадках в процессах соокисления бактериальному разрушению подвергаются также аллохтонные труднодоступные, а нередко токсичные вещества.

Существенную роль в получении результатов имели разработанные автором схемы и методики, основная особенность которых заключается в комплексной оценке валовых аэробных и анаэробных деструкционных потоков в природных условиях с максимально возможным учетом побочных окислительных реакций и процессов реассимиляции конечных продуктов распада органического вещества. Такой подход позволил обнаружить, что анаэробные процессы распада в отложениях играют важную роль во всех водоемах, а большинстве из них – доминирующую. При этом в илах продуктивных озер и водохранилищ решающий вклад в анаэробную деструкцию принадлежит процессам метаногенеза.

Показано, что ведущим экологическим фактором, определяющим уровень валовой деструкции ОВ в донных отложениях, является их обеспеченность лабильными соединениями и в целом – трофический статус водоемов. Направленность деструкционных потоков обусловлена Red/Ox условиями и кислородным режимом водоема в целом.

Полученные в настоящей работе материалы о роли илового распада ОВ в круговороте органического вещества разнотипных внутренних водоемов, в формировании среды обитания гидробионтов и утилизации труднодоступных соединений позволяют внести существенные поправки в схемы расчетов балансов и потоков вещества и энергии. Количественные оценки аэробных и анаэробных валовых процессов распада органических соединений в донных отложениях водоемов должны войти в обязательную программу гидробиологических исследований.

## ВЫВОДЫ

1 Суммарная деструкция органического вещества в летний период достигает в донных отложениях озер разного типа миктичности и уровня трофии 0 1–6 г С/(м<sup>2</sup> сут), в грунтах водохранилищ – 0 16–0 42 г С/(м<sup>2</sup> сут), в осадках техногенных водных объектов – 2–5 г С/(м<sup>2</sup> сут), что составляет 0 02–1 5% от содержания С<sub>орг</sub> в поверхностном слое донных отложений

2 Микробиологические процессы цикла метана регистрируются во всех водоемах и донных биотопах Интенсивность метаногенеза в озерах колеблется от 10 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) в осадках олиготрофных водоемов до 4200 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) в илах гиперэвтрофных, в водохранилищах – от 0 5 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) в грунтах речных участков до 440 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) в отложениях продуктивных зон, в техногенных осадках она составляет 10–3500 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут) Скорость метаноокисления варьирует в пределах 0 2–180 мл СН<sub>4</sub>/(м<sup>2</sup> сут).

3 Анаэробные процессы распада органического вещества протекают повсеместно с максимумом в восстановленных осадках, составляя в среднем на водоем 33–95% от суммарной деструкции В илах продуктивных озер, где анаэробный деструкционный поток доминирует, доля в нем метаногенеза достигает 30–80%

4 Аэробная минерализация органического вещества наиболее интенсивна в окисленных отложениях голомиктических озер и водохранилищ, где составляет 20–60% суммарной иловой деструкции В таких грунтах расход кислорода в процессах метаноокисления достигает 35–80% от общего потребления О<sub>2</sub>

5 Распад ОВ в донных отложениях является весомым трофическим звеном водных экосистем и фактором формирования окружающей среды. Его доля в общеводоемном деструкционном потоке колеблется летом от 21 до 74%, в подледный период достигает 90%, а в годичном цикле составляет 25–38% При усвоении бактериобентосом депонированных в осадках труднодоступных веществ создается усвояемый белок, а выделяющиеся в воду биогенные соединения используются фотосинтезирующими организмами

6 Ведущими экологическими факторами, определяющими уровень валовой деструкции ОВ в донных отложениях и направленность отдельных потоков распада, являются обеспеченность лабильным органическим веществом, а также Red/Ox условия и кислородный режим водоемов

7 В озерных экосистемах интенсивность и направленность микробиологических процессов деструкции в отложениях в целом зависят от их трофического статуса В водохранилищах важную роль играет географическое расположение – в грунтах северных водоемов – Верхней Волги и Камы доминируют процессы анаэробного распада, на Нижней Волге и в Цимлянском водохранилище – преобладает аэробная минерализация ОВ, на Средней Волге потоки иловой деструкции сбалансированы

**Список основных публикаций по теме диссертации**

- 1 Дзюбан А Н Численность, время генерации и продукция бактерий в воде и илах Саратовского водохранилища // Гидробиол журн 1975 Т 11 № 3 С 14-18
- 2 Дзюбан А Н Первичная продукция, деструкция органического вещества и численность бактерий в воде Саратовского водохранилища // Гидробиол журн 1977 Т 13 № 1 С 81-85
- 3 Дзюбан А Н Деструкция органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волги и Камы // Биология внутренних вод Информ бюлл Л Наука, 1977 № 36 С 33-37
- 4 Дзюбан А Н Микрофлора донных отложений водохранилищ Волги и Камы // Биология внутренних вод Информ. бюлл, Л, 1977 № 36 С 37-41
- 5 Саралов А И, Дзюбан А.Н Фиксация молекулярного азота в евтрофном озере Белое // Микробиология 1978 Т 47 Вып 1 С 138-140
- 6 Дзюбан А Н Количество маслянокислых бактерий, относящихся к роду Clostridium, в иловых отложениях водохранилищ Волги // Микробиология 1978 Т 47 Вып 6 С 1124-1125
- 7 Дзюбан А Н Численность бактерий и деструкция органического вещества в донных отложениях Саратовского водохранилища // Биология внутренних вод Информ бюлл Л Наука, 1978 № 40 С 11-15
- 8 Дзюбан А Н Микрофлора и деструкция органического вещества в донных отложениях Цимлянского водохранилища // Водные ресурсы 1979 № 5 С 172-176
- 9 Дзюбан А Н Деструкция органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волги // Микробиологические и химические процессы деструкции органического вещества в водоемах М-Л Наука, 1979 С 142-150
- 10 Саралов А И, Вайнштейн М Б, Дзюбан А Н Фиксация молекулярного азота в воде и донных отложениях меромиктических озер Марийской АССР // Микробиологические и химические процессы деструкции органического вещества в водоемах М-Л Наука, 1979 С 95-114
- 11 Дзюбан А Н Микрофлора илов Рыбинского водохранилища и ее активность в зимний период // Биология внутренних вод Информ бюлл Л, 1980 № 45 С 8-12
- 12 Саралов А И, Дзюбан А Н, Крылова И Н Фиксация молекулярного азота в водной массе некоторых евтрофных и полигуменных озер Эстонской ССР // Микробиология 1980. Т 49 Вып 4 С 608-614
- 13 Саралов А И, Дзюбан А Н, Крылова И Н Фиксация молекулярного азота и активность микрофлоры в грунтах некоторых озер Эстонской ССР и Рыбинского водохранилища // Микробиология 1980 Т 49 В 5 С 608-614
- 14 Дзюбан А Н Динамика распределения бактериопланктона в низовье р Самары // Водные ресурсы 1982 № 2 С 162-164

- 15 Дзюбан А Н Интенсивность микробиологических процессов деструкции органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волги // Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ М Наука, 1984 С 139-141
- 16 Дзюбан А Н, Дзюбан Н А, Саврасов А П Микробиологическая характеристика Саратовского водохранилища на участке Самарской Луки // Водные ресурсы, 1985 № 2 С. 112-117
- 17 Дзюбан А Н Распад органического вещества и микрофлора в донных отложениях некоторых озер Латвийской ССР // Водные ресурсы 1985 № 6 С 128-132
- 18 Дзюбан А Н, Тимакова Т М Микрофлора и деструкция органического вещества в воде и донных отложениях Пертозера // Гидробиол журн 1986 № 22 С 40-44
- 19 Дзюбан А Н Определение деструкции органического вещества в донных отложениях водоемов // Гидробиол журн 1987. № 2 С 30-35
- 20 Дзюбан А Н, Коргина И В, Крылова И Н, Соколова Е А Сезонная динамика микробиологических процессов в озерах Северо-Двинской системы // Водные ресурсы 1987 № 1 С 104-110
- 21 Дзюбан А Н Деструкция органического вещества в донных отложениях озер Северо-Двинской системы и ее роль в круговороте углерода // Водные ресурсы 1987 № 2 С 93-101
- 22 Дзюбан А Н Некоторые особенности учета количества маслянокислых бактерий в илах водоемов // Микробиология 1987 Т 56 Вып 1 С 163-165
- 23 Дзюбан А Н Деструкция органического вещества в донных отложениях оз. Плещеево (Ярославская обл) // Изучение взаимодействий в системе "Вода - донные отложения Ереван, 1987 С 97-101
- 24 Дзюбан А Н Горбенко А Ю Оптимизация метода прямого счета бактерий в донных отложениях водоемов // Микробиология 1989 Т 58 Вып 5 С 871-875
- 25 Дзюбан А Н, Даукшта А С, Захарова Л И Микробиологическая характеристика оз Стропу (Лат ССР) // Биология внутренних вод Информ бюлл Л Наука, 1989 N 82 С 12-17
- 26 Дзюбан А Н Экосистема озера Плещеево (разд Микрофлора) Л Наука, 1989 С 129-155
- 27 Дзюбан А Н Экосистема озера Плещеево (разд Особенности продукционного и деструкционного процессов) Л Наука, 1989 С 213-216
- 28 Дзюбан А Н, Бикбулатов Э С, Пырина И Л Экосистема озера Плещеево (разд Баланс органического вещества) Л Наука, 1989 С 216-218
- 29 Дзюбан А Н Влияние р Трубеж на микробиологические процессы в оз Плещеево // Факторы и процессы эвтрофикации озера Плещеево Ярославль ЯрГУ, 1992 С 144-161

- 30 Дзюбан А Н, Косолапов Д Б Микробиологическая характеристика озера Плещеево // Тр Всеросс конф 300 лет Отеч флота Переславль-Залесский, 1992 В 3 С. 58-68
- 31 Горбенко А Ю, Дзюбан А Н, Крылова И Н Абсолютный количественный учет бактерий в донных отложениях // Микробиология 1992 Т 61 Вып 6 С 1082-1086
- 32 Дзюбан А Н Темновая ассимиляция CO<sub>2</sub> и деструкция органического вещества в грунтах водохранилищ Волго-Камского каскада и некоторых озер // Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ СПб Наука, 1993 С 24-35
- 33 Дзюбан А Н Численность некоторых видов маслянокислых бактерий в грунтах волжских водохранилищ и озер разного уровня трофии в зависимости от содержания органических веществ // Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ СПб Наука, 1993 С 47-64
- 34 Kozlovskaya V I, Dzyuban A N, Bakanov A I et al Monitoring of aquatic ecosystems within precincts of a large industrial city // Symp on monitoring of water pollution Borok, 1994 P 15
- 35 Dzyuban A, A Kopylov, D Kosolapov, J Krylova, V Kozlovskaya, T La Point Effect of industrial-sanitary sewage on benthic microbial communities in the Upper Volga (Russia) // Partnerships for the Environment Science, Education and Policy Wash DC SETAC, 1996 P 303-304
- 36 Дзюбан А Н Зональность микробиологических процессов в донных отложениях водохранилищ Волго-Камского каскада // Проблемы биологического разнообразия водных организмов Тольятти, 1997 С 30-35
- 37 Дзюбан А Н, Косолапов Д Б, Кузнецова И А Оценка экологического состояния водохранилищ Верхней Волги по критериям бактериобентоса // Биотехноэкологические проблемы бассейна Верхней Волги Ярославль ЯрГУ, 1998 С 43-48
- 38 Дзюбан А Н, Георгиев А Н, Крылов А В, Кузнецова И А Бактериопланктон и зоопланктон в подледный период трех разнотипных озер // Биология внутренних вод 1998 № 2 С 44-51
- 39 Дзюбан А Н Численность бактерий и процессы превращения метана в донных отложениях водохранилищ Волги и Камы // Микробиология 1998 Т 67 № 4 С 473-475
- 40 Дзюбан А Н Бактериопланктон нижнего течения реки Амур // Микробиология 1999 Т 68 № 4 С 557-564
- 41 Дзюбан А Н, Крылова И Н, Кузнецова И А Особенности распределения бактерий и газовый режим в водной толще Балтийского моря в зимний период // Океанология 1999 Т 39 № 3 С 383-386.
- 42 Дзюбан А.Н Микробиологические процессы круговорота органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада // Водные ресурсы 1999 Т 26, № 4 С 262-271

- 43 Дзюбан А Н Бактериопланктон и микробиологическое окисление метана в воде загрязняемой малой реки // Биология внутренних вод 2000 №2 С 65-72
- 44 Дзюбан А Н, Крылова И Н Оценка состояния бактериопланктона и бактериобентоса Рыбинского водохранилища в районе г. Череповца // Биология внутренних вод 2000, № 4 С 68-79
- 45 Кузнецова И А, Дзюбан А Н, Косолапов Д Б Микробиологические процессы в донных отложениях водоемов бассейна Верхней Волги и их роль в формировании качества водной среды // Современные проблемы биологии и химии Ярославль ЯрГУ 2000 С 55-59
- 46 Дзюбан А Н, Косолапов Д Б, Кузнецова И А Микробиологические процессы в Горьковском водохранилище // Водные ресурсы 2001 Т 28 № 1 С 47-57
- 47 Дзюбан А Н, Кузнецова И А, Пименов Н В Микробиологические процессы деструкции органического вещества в донных осадках Балтийского моря // Океанология 2001 Т 41 №2 С 217-223
- 48 Кузнецова И А, А.Н. Дзюбан Микробиологические процессы в донных отложениях водоемов бассейна Верхней Волги и их роль в формировании качества водной среды // Актуальные проблемы биологии и экологии Сыктывкар, 2001 С 34-36
- 49 Дзюбан А Н, Горбенко А Ю, Буторин А.Н, Кузнецова И Н Оптимизация метода учета бентосных бактерий // Гидробиол журн 2001 Т 37 № 4 С 102-107.
- 50 Дзюбан А Н, Масленникова Т.С, Кузнецова И А, Цветков А И Реакция бактериобентосного сообщества на нефтяное загрязнение донных отложений водоемов // Проблемы экологии, биологии, химии Ярославль ЯрГУ, 2001 С 51-54
- 51 Дзюбан А Н, Косолапов Д Б, Кузнецова И А Метан и процессы его превращения в воде и грунтах // Экологические проблемы Верхней Волги Ярославль ИБВВ РАН, 2001 С 262-271
- 52 Дзюбан А Н Интенсивность микробиологических процессов круговорота метана в разнотипных озерах Прибалтики // Микробиология 2002 Т 71 № 1 С 111-118
- 53 Дзюбан А Н Деструкция органического вещества и процессы превращения метана в донных отложениях Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод 2002 № 1 С 35-42
- 54 Дзюбан А Н Метан и микробиологические процессы его трансформации в воде верхневолжских водохранилищ // Водные ресурсы 2002 Т 29 № 1 С 68-78
- 55 Кузнецова И А, Дзюбан А Н Определение валовой деструкции органического вещества в донных отложениях водоемов // Гидробиол журн 2001 Т 38 № 5 С 94-98

- 56 Дзюбан А Н Микробиологические процессы окисления метана в воде озера Плещеево (Ярославская обл) // Биология внутренних вод 2002 № 3 С 29-33
- 57 Дзюбан А Н Первичные продукционные процессы в воде Тугурского залив Охотского моря // Океанология 2003 Т 43 № 3 С 383-392
- 58 Дзюбан А Н Численность бактерий и микробиологические процессы в воде Тугурского залива Охотского моря // Микробиология 2003 Т 72 № 3 С 419-426
- 59 Дзюбан А Н Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища (разд. Бактериопланктон) Ярославль ЯрГТУ, 2002 С 76-89
- 60 Дзюбан А Н, Косолапов Д Б Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища (разд Бактериобентос) Ярославль ЯрГТУ, 2002 С 154-164
- 61 Дзюбан А Н, Минеева Н М Современное состояние экосистемы Шекснинского водохранилища (разд Характеристика продукционно деструкционных процессов) Ярославль ЯрГТУ, 2002 С 146-153
- 62 Дзюбан А Н Бактериопланктон и бактериобентос некоторых припойменнь озер низовья реки Амур // Микробиология 2002 Т 71 № 4 С 550-557
- 63 Дзюбан А Н Микробиологические процессы окисления метана в воде озер Плещеево (Ярославская обл) // Биология внутренних вод 2002 № 3 С 29-33
- 64 Дзюбан А Н Первичные продукционные процессы в воде Тугурского залива Охотского моря // Океанология 2003 Т 43 № 3 С 383-392
- 65 Дзюбан А Н Численность бактерий и микробиологические процессы в воде Тугурского залива Охотского моря // Микробиология 2003 Т 72 № 3 С 419-426
- 66 Дзюбан А Н Роль процессов цикла метана в круговороте органического вещества в озерах разного типа // Водные ресурсы 2003 Т 30 № 4 С 452-460
- 67 Дзюбан А Н Бактериобентос водохранилищ Верхней Волги как показатель экологического состояния водоемов // Водные ресурсы 2003 Т 30 № 6 С 742-749
- 68 Кузнецова И А, Романенко А В, Дзюбан А Н Микробиологические процессы цикла метана в воде некоторых малых рек – притоков Рыбинского водохранилища // Современные проблемы биологии, экологии, химии Ярославль ЯрГУ, 2003 С 25-28
- 69 Дзюбан А Н Структурно-функциональные изменения бактериобентоса под воздействием длительного загрязнения водоема // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей Матер IV научн конф Петропавловск-Камчатский, 2003 С 159-162

- 70 Кузнецова И А , Дзюбан А Н Изменения структуры и функционирования бактериальных сообществ под воздействием нефтяного загрязнения грунтов // Биология внутренних вод 2004 №1 С 110-112
- 71 Кузнецова И А , А Н Дзюбан Метан и микробиологические процессы его трансформации в воде малых рек и водотоков бассейна Рыбинского водохранилища // Актуальные проблемы биологии и экологии Сыктывкар, 2004 С 27-31
- 72 Дзюбан А Н. Микробиологические процессы превращения метана и деструкция органического вещества в грунтах водохранилищ Волги и Камы // Гидробиол журн 2004 Т 40, № 2 С 72-77
- 73 Дзюбан А Н Микробиологические процессы деструкции органического вещества и трансформации метана в донных отложениях озер Прибалтики // Биология внутренних вод 2004 № 3 С 29-37
- 74 Дзюбан А Н Оценка экологического состояния волжских водохранилищ по критериям бактериобентоса // Рациональное использование и охрана водных ресурсов в изменяющейся окружающей среде Т. 2 Ереван МГС, 2004 С 83-87
- 75 Дзюбан А Н, Кузнецова И Н Метан как показатель экологического состояния проточных водоемов // Рациональное использование и охрана водных ресурсов в изменяющейся окружающей среде Т 2 Ереван МГС, 2004 С 102-104
- 76 Дзюбан А Н Оценка экологического состояния водохранилищ по критериям бактериобентоса // Гидробиол журн 2004 Т 40, № 4 С 73-79
- 77 Дзюбан А Н Экологическое состояние Шекснинского водохранилища оценка на основе микробиологических исследований // Водные ресурсы 2005 Т 32 № 1 С 70-78
- 78 Дзюбан А Н Маслянокислые бактерии, относящиеся к роду *Clostridium*, в донных отложениях внутренних водоемов разного типа // Микробиология 2005 Т 74 № 1 С 119-125
- 79 Кузнецова И А Дзюбан А Н Метанотрофное бактериальное сообщество илов под воздействием нефтяного загрязнения водоемов // Актуальные проблемы экологии Ярославской области Вып 3 (1) Ярославль РАЭ, 2005 С 207-212
- 80 Кузнецова И А , Дзюбан А Н. Микробиологические процессы трансформации метана в прибрежье Рыбинского водохранилища // Актуальные проблемы экологии Ярославской области Вып 3 (1) Ярославль РАЭ, 2005 С 212-216
- 81 Романенко А В , Дзюбан А.Н, Кузнецова И А Метан в грунтах притоков Рыбинского водохранилища в зоне воздействия Череповецкого промышленного комплекса // Актуальные проблемы экологии Ярославской области Вып 3 (1) Ярославль РАЭ, 2005 С 275-279

- 82 Кузнецова И А, Дзюбан А Н Микробиологические процессы трансформации метана в воде мелководий Рыбинского водохранилища // Микробиология. 2005 Т 74 № 6 С 856-858
- 83 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
- 84 Дзюбан А Н Микробиологическая характеристика донных отложений Верхней Волги в условиях антропогенного воздействия // Биология внутренних вод 2006 №1 С 16-23
- 85 Кузнецова И А, Дзюбан А Н Бактериобентосные сообщества под воздействием нефтяного загрязнения водоемов // Гидробиол журн 2006 Т 42 № 5 С 88-93

Лицензия ПД 00661 Подписано в печать 15 08 07

Объем 2 п л Заказ 1058 Тираж 100 экз

Отпечатано в типографии Ярославского государственного технического  
университета

150000 г. Ярославль, ул Советская, 14а

Тел 30-56-63