

УДК 579.68(28); 570.68(28)

**А. Н. Дзюбан**

**ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В  
ГРУНТАХ ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛГИ И КАМЫ.  
РОЛЬ МЕТАНОГЕНЕЗА**

В результате многолетних наблюдений выявлены особенности микробных процессов деструкции органического вещества и образования метана в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада. Показано, что эти процессы являются не только важнейшим звеном круговорота углерода, но и мощным средообразующим фактором в их экосистемах.

*Ключевые слова:* деструкция органического вещества, донные отложения, метаногенез.

Важная роль бактериального населения водоемов в процессах круговорота органического вещества и «самоочищения воды» общеизвестна, причем особое место в них принадлежит микрофлоре донных отложений (ДО). Значительная часть автохтонного и аллохтонного органического вещества (ОВ), не успевая разложиться в водной толще, осаждается на поверхности отложений, где происходит его деструкция (Д). Ведущую роль в этом процессе играют сложные бактериальные комплексы, состав и активность которых зависят от типа водоемов, их продуктивности, а также от физико-химических условий в грунтах. При поступлении в ДО растворенного  $O_2$  там преобладает аэробная минерализация ОВ с образованием нейтральных биогенных веществ. Однако на участках вблизи городов и промышленных предприятий, где накапливаются различные бытовые и хозяйственные отходы, в ДО происходят изменения естественных окислительно-восстановительных (*Red/Ox*) условий, а также структуры и функционирования микробных сообществ. Последнее ведет к активизации анаэробных процессов деструкции ОВ, при этом восстановленные продукты анаэробного распада, токсичные для большинства гидробионтов, выделяются в воду — то есть идет «вторичное загрязнение» водоема.

Цель работы — обобщение многолетних (1982—2005 гг.) исследований особенностей бактериальных процессов деструкции ОВ в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада, выявление изменений в функционировании аэробных и анаэробных сообществ, осуществляющих эти процессы, и роли в них микробного метаногенеза.

© А. Н. Дзюбан, 2015

**1. Общая характеристика водохранилищ в летние периоды 1965—1997 гг.**  
[1, 7, 9]

Водохранилища	S, км <sup>2</sup>	K <sub>вод</sub> в год	Уровень трофии	Фотосинтез	Δ в воде
				мг С/(л·сут)	
Иваньковское	327	10,6	Евтрофный	0,10—0,43	0,11—0,42
Угличское	249	10,1	Мезотрофный	0,03—0,20	0,05—0,20
Рыбинское	4550	1,9	Тот же	0,04—0,24	0,05—0,22
Горьковское	1591	6,1	Мезо-евтрофный	0,11—0,43	0,10—0,34
Чебоксарское	1270	20,9	Тот же	0,10—0,42	0,10—0,32
Куйбышевское	6150	4,2	Тот же	0,11—0,33	0,10—0,42
Саратовское	1831	19,1	Мезотрофный	0,05—0,21	0,05—0,23
Волгоградское	3117	8,0	Евтрофный	0,22—0,43	0,10—0,54
Камское	1915	4,2	Антропогенно-дистрофный	0,02	0,09
Воткинское	1065	5,8	Тот же	0,02	0,04
Нижекамское	1000	6,6	Мезотрофный	0,02	0,05

Примечание. K<sub>вод</sub> — коэффициент водообмена.

**Материал и методика исследований.** Водохранилища Волжско-Камского каскада простираются с севера на юг, охватывая своим бассейном основную часть европейской территории РФ. Они различаются как по географическому расположению, морфометрии, гидрологическому режиму, характеру подстилающих пород, так и по комплексу трофических характеристик (табл. 1).

Исследования деструкции ОВ в отложениях водохранилищ проводили обычно летом или в начале осени по традиционной схеме [3, 8] в герметичных цилиндрах с монолитом ила и придонной водой. Интенсивность аэробных процессов ( $\Delta_a$ ) оценивали по поглощению из воды  $O_2$ , общую деструкцию ( $\Delta_{общ}$ ) — по выделению из грунта метаболического  $CO_2$ , анаэробную составляющую ( $\Delta_{ан}$ ) рассчитывали по разности между величинами общей и аэробной  $\Delta$  ( $\Delta_{общ} - \Delta_a$ ).

Интенсивность процессов метаногенеза в ДО оценивали газохроматографическим способом [12], определяя содержание  $CH_4$  в анализируемых пробах методом фазового равновесия [11] на газовом хроматографе Chrom-5 с пламенно-ионизационным детектором и сорбентом Poragac-N в токе He. Схема постановки экспериментов с использованием оригинальных сосудов и ингибиторов, ход лабораторной обработки и последующих расчетов приведены в [4—6, 11].

Окислительно-восстановительный потенциал (*Red/Ox*) осадков в виде Eh измеряли с помощью иономера Radelkis, органический углерод ( $C_{орг}$ ) — на

## 2. Общая характеристика грунтов водохранилищ Волги и Камы

Типы грунтов	Eh, мВ		C <sub>орг</sub> , мг/см <sup>3</sup>		CH <sub>4</sub> , мл/дм <sup>3</sup>
	0—1 см	1—3 см	общий	C <sub>лг</sub>	
Речные пески	180—100	75—40	0,5—3,7	0,1—0,2	< 0,1
Илистые пески	105—30	40—(-65)	3,2—7,2	0,3—0,6	0,01—0,1
Песчаные илы	85—40	-10—(-85)	5,3—16,6	0,1—1,4	0,9—5,7
Глинистые илы	60—10	-10—(-105)	8,5—16,8	0,6—1,6	0,9—7,7
Детритные илы	85—10	-10—(-80)	9,2—26,4	1,3—3,1	2,1—10,5
Антропогенные черные илы	25—(-85)	-45—(-135)	7,9—30,1	0,8—3,8	1,2—24,6

газохроматографическом анализаторе CNH-1. Легкогидролизуемые фракции ОВ (C<sub>лг</sub>) выделяли для анализа обработкой проб илов 5%-ной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [6].

*Результаты исследований и их обсуждение*

На формирование донных отложений в водохранилищах влияют не только особенности климатических условий и окружающего природного ландшафта, но также уровень их продуктивности, гидрологический режим на отдельных участках, степень и характер антропогенного воздействия. Этим обусловлено чрезвычайное разнообразие грунтов в водоемах каскада по физико-химическим свойствам (табл. 2), особенно важными из которых для функционирования бактериобентоса являются *Red-Ox* условия, а также содержание и состав ОВ.

В волжских водохранилищах масштабы аэробных процессов на основной части донного ложа были за период исследований в целом близки (табл. 3), составляя летом (с учетом ХПК) 0,01—0,06 г С в песках, 0,25—0,30 г С/(м<sup>2</sup>·сут) [3, 4]. В илах загрязненных участков D<sub>а</sub> достигала 0,36—0,46 г С/(м<sup>2</sup>·сут). Колебания интенсивности анаэробного распада оказались значительно резче. В зависимости от типа отложений и *Red/Ox*, величина D<sub>ан</sub> варьировала летом от отрицательных значений до 0,8 г С/(м<sup>2</sup>·сут). В целом отмечалось снижение интенсивности анаэробных процессов от Верхней Волги к Нижней (табл. 3). Общая же оценка деструкции ОВ в волжских водохранилищах колебалась за время исследований 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, богатых лабильным ОВ [3, 4].

Водоемы Камы, испытывающие мощное техногенное воздействие, по ряду функциональных микробиологических и продукционно-деструкционных характеристик приближаются к аналогичным показателям дистрофных озер, что послужило причиной отнести эти водохранилища к разряду «антропогенно дистрофируемых» [3].

## 3. Деструкция ОВ в отложениях водохранилищ (пределы колебаний)

Водохранилища	Участки	Валовая деструкция, г С/(м <sup>2</sup> ·сут)		
		общая	аэробная	анаэробная
Иваньковское	Реч	0,08—0,22	0,08—0,20	0—0,02
	Оз	0,27—1,10	0,13—0,24	0,11—0,8
Угличское	Реч	0,07—0,28	0,06—0,18	0,01—0,10
Рыбинское	Реч	0,12—0,22	0,08—0,12	0,04—0,10
	Оз	0,15—0,62	0,07—0,32	0,09—0,40
Горьковское	Реч	0,03—0,23	0,02—0,13	0,01—0,10
	Оз	0,2—0,82	0,08—0,40	0,11—0,42
Чебоксарское	Реч	0,08—0,34	0,08—0,14	0—0,21
	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—0,32	0,2—0,22	0,06—0,10
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—0,30	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—0,63	0,02—0,30	-0,01—0,33

П р и м е ч а н и е. Реч — речной участок; Оз — озерный.

Аэробная деструкция в грунтах камских водохранилищ, с учетом ХПК (5—53% [3, 4]), в целом была низкой (см. табл. 3). В песчанистых грунтах она составляла в период исследований 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  $D_a$  достигала 0,3 г С/(м<sup>2</sup>·сут). Анаэробная деструкции ОВ в отложениях Камы так же оказалась повсеместно низкой, несмотря на благоприятные для анаэробов  $Red/Ox$  условия и обеспеченность  $S_{орг}$ . В зависимости от типа отложений,  $D_{ан}$  по традиционным расчетам варьировала от отрицательных значений в глубоко восстановленных илах до 0,3 г С/(м<sup>2</sup>·сут) в слабо восстановленных ДО Нижнекамского водохранилища. Лишь в черных илах особо загрязняемого участка Камского водохранилища анаэробный распад достигал 0,6 г С/(м<sup>2</sup>·сут) (см. табл. 3).

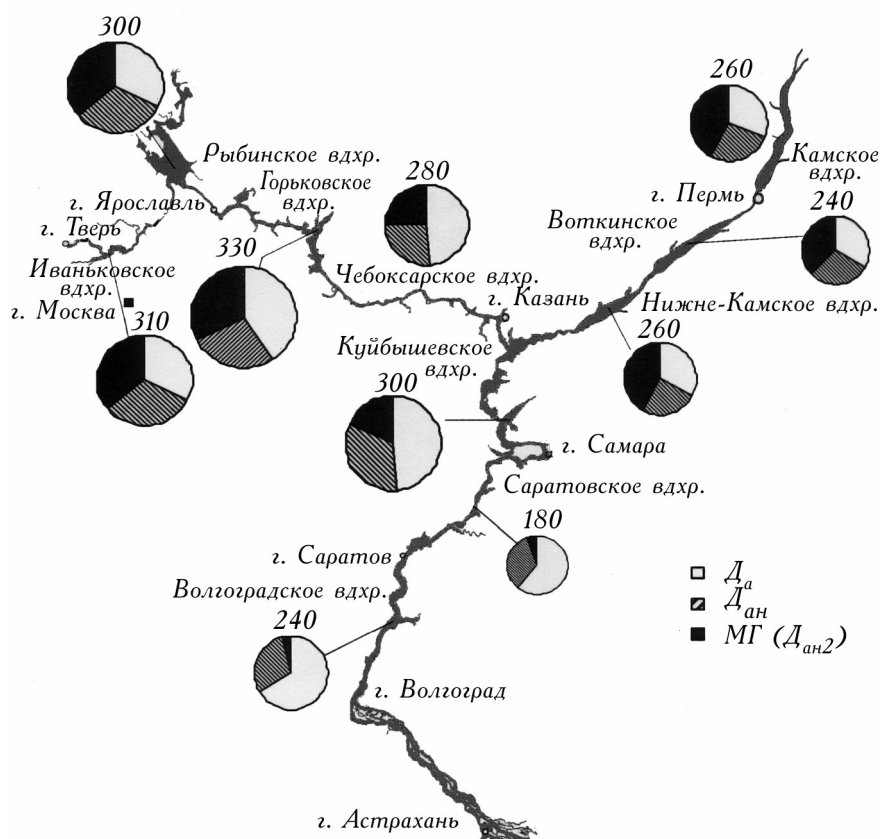
## 4. Роль метаногенеза в распаде ОВ в ДО водохранилищ (пределы колебаний)

Водохранилища	ПМ, мл CH <sub>4</sub> /(м <sup>2</sup> ·сут)	Деструкция с учетом ПМ, г С/ (м <sup>2</sup> ·сут)		Вклад ПМ в деструкцию, %	
		Δ <sub>сум</sub>	Δ <sub>ан.п</sub>	в Δ <sub>сум</sub>	в Δ <sub>ан.п</sub>
Иваньковское	0,2—340	0,40—1,51	0,35—0,51	1—8	7—60
Рыбинское	0,2—300	0,04—0,80	0,02—0,45	2—10	10—65
Горьковское	2,1—255	0,09—0,85	0,02—0,44	1—4	5—52
Чебоксарское	0,4—280	0,09—0,79	0,04—0,70	1—5	7—45
Куйбышевское	0,2—124	0,09—0,76	0,02—0,39	1—13	5—50
Саратовское	0,2—88	0,02—0,39	0,01—0,14	1—5	1—28
Волгоградское	0,1—31	0,01—0,59	0,01—0,58	1—7	1—32
Камское	1,8—418	0,02—0,58	0,01—0,44	2—28	15—86
Воткинское	2,2—275	0,02—0,35	0,01—0,24	1—26	12—80
Нижекамское	1,0—436	0,02—0,82	0,01—0,51	2—24	18—95

Известно, что в ДО пресноводных водоемов основную роль деструкторов-анаэробов играют микроорганизмы, образующие метан [10], причем при функционировании некоторых групп метаногенов биохимические процессы синтеза CH<sub>4</sub> идут по «автотрофному» пути — из H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. То есть в иловом сообществе происходит реассимиляция метаболического CO<sub>2</sub>, выделяемого другими микроорганизмами-деструкторами, что ведет к уменьшению его поступления в придонную воду. Так в водоемах, близких по экологическим условиям к водохранилищам каскада, образование CH<sub>4</sub> с использованием реассимилированной углекислоты составляет в среднем около 50% общего метаногенеза [2]. В результате происходит недоучет потока метаболического CO<sub>2</sub>, что при расчетах валовой иловой деструкции традиционным методом ведет к снижению оценки этого процесса. Последнее показало необходимость углубленного изучения экологической роли микробного цикла метана в водохранилищах.

Проведенные исследования выявили в водоемах Волго-Камского каскада широкое варьирование интенсивности илового метаногенеза по отдельным участкам в зависимости от физико-химических условий в ДО. Расчет продукция CH<sub>4</sub> (ПМ) в грунтах водохранилищ показал, что минимальная ПМ свойственна пескам и глинам речных участков, максимальная — осадкам загрязняемых зон. Особенно высока ПМ в камских грунтах (табл. 4), где она достигала в период исследований 440 мл/(м<sup>2</sup>·сут). В отложениях волжских водоемов ПМ колебалась в тот же период от 0,1 до 380 мл/(м<sup>2</sup>·сут), уменьшаясь в среднем с севера на юг [4, 5].

Данные по продукции CH<sub>4</sub> в отложениях позволили внести важное дополнение в схему расчетов и получить оценку суммарной иловой деструкции (Δ<sub>сум</sub>) и полной анаэробной деструкции (Δ<sub>ан.п</sub>):



Зональные особенности соотношений аэробной и анаэробной деструкции ОВ в грунтах водохранилищ, мг С/(м<sup>2</sup>·сут) в среднем на все донное ложе; D<sub>а</sub> — аэробная деструкция; D<sub>ан</sub> — анаэробная (по СО<sub>2</sub>); МГ (D<sub>ан2</sub>) — вклад метаногенеза в суммарную деструкцию. Цифры над кружками — суммарная (D<sub>сум</sub>) деструкция ОВ.

$$D_{\text{сум}} = D_{\text{общ}} (\text{по } \text{CO}_2) + \frac{1}{2} \text{С ПМ};$$

$$D_{\text{ан.п}} = D_{\text{сум}} - D_{\text{а}}.$$

Более полный расчет деструкции в грунтах водохранилищ показал, что процессы образования метана играют весомую роль в распаде ОВ, особенно в илах озеровидных плесов. В ДО волжских водоемов вклад ПМ в суммарную деструкцию составляет 1—13%, а в камских — достигает 28%. С учетом метаногенеза увеличивается не только результат расчета суммарной иловой деструкции, но также возрастает оценка полного анаэробного распада ОВ, причем вклад ПМ в D<sub>ан.п</sub> достигает в загрязняемых отложениях камской части каскада 80—90% (см. табл. 4). Все это свидетельствует о большой значимости процессов микробного цикла метана в функционировании экосистем водохранилищ.

В результате глубокого изучения всех звеньев деструкции ОВ в донных отложениях, особенно метаногенеза, удалось выявить эколого-географиче-

ские (зональные) особенности ее распределения [4, 5]. Оказалось, что в грунтах северных водохранилищ (Верхней Волги и Камы) доминируют процессы анаэробного распада, на Нижней Волге — преобладает аэробная минерализация ОВ, а на Средней Волге потоки иловой деструкции сбалансированы. Причем в грунтах водоемов Камского каскада, перегруженных различными аллохтонными (особенно техногенными) органическими соединениями, значимость процессов метаногенеза в суммарной деструкции особенно велика, а в илах южных водоемов, обогащенных лабильным  $C_{орг}$ , доля метаногенеза в  $\Delta_{сум}$  — минимальна (рисунок).

### Заключение

Таким образом, интенсивность и направленность микробных процессов деструкции ОВ определяются в первую очередь составом ОВ, запасом легкогидролизуемых соединений, *Red/Ox* условиями, гидрологическим режимом, степенью и характером антропогенного воздействия.

Выявлена эколого-географическая зональность валовых деструкционных потоков: общее количество разрушаемого в осадках  $C_{орг}$  (в среднем на водоем) уменьшается в каскаде с севера на юг; в водоемах Верхней Волги и Камы анаэробные процессы преобладают над аэробными, на Средней Волге они сбалансированы, в водоемах Нижней Волги преобладает аэробная минерализация.

Количественные оценки продукции метана в ДО, выполненные для водоемов всего каскада, свидетельствуют о его повсеместной экологической значимости, особенно на участках антропогенного давления и в целом на камских водохранилищах, где вклад метанообразования достигает 60—95% в анаэробном распаде ОВ. Показано, что микробные процессы деструкции  $C_{орг}$  в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада являются не только важнейшим звеном круговорота углерода, но также мощным средообразующим фактором в их экосистемах [5, 9].

\*\*

*У донних відкладах водосховищ Волзько-Камського каскаду виявлено особливості мікробних процесів деструкції органічної речовини та утворення метану. Показано, що ці процеси є не лише важливою ланкою кругообігу вуглецю, але й потужним середоутворюючим чинником.*

\*\*

*The patterns of the processes of microbial destruction of organic matter and methane formation are determined in bottom sediments in reservoirs of the Volga-Kama cascade. It is demonstrated that these processes are not only an important part of carbon cycle but a powerful medium-forming factor.*

\*\*

1. Авакян А.Б., Широков В.М. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. — Минск: Университетское, 1990. — 240 с.

2. *Беляев С.С., Лебедев В.С., Лауринавичус К.С.* Современное микробиологическое образование метана в пресных озерах Марийской АССР // *Геохимия*. — 1979. — Т. 6. — С. 933—940.
3. *Дзюбан А.Н.* Микробиологические процессы деструкции органического вещества в донных отложениях внутренних водоемов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М., 1983. — 24 с.
4. *Дзюбан А.Н.* Микробиологические процессы круговорота органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада // *Вод. ресурсы*. — 1999. — Т. 26, № 4. — С. 262—271.
5. *Дзюбан А.Н.* Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. — Ярославль: Принтхаус, 2010. — 192 с.
6. *Кузнецов С.И., Дубинина Г.А.* Методы изучения водных микроорганизмов. — М.: Наука, 1989. — 286 с.
7. *Романенко В.И.* Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. — Л.: Наука, 1985. — 295 с.
8. *Романенко В.И., Кузнецов С.И.* Деструкция органического вещества в иловых отложениях // *Микробиология*. — 1972. — Т. 41, № 2. — С. 356—361.
9. *Экологические проблемы Верхней Волги* / под ред. А. И. Копылова. — Ярославль: Изд-во Ярослав. ун-та, 2001. — 427 с.
10. *Sappenberg T.E., Hordijk C.A., Hagenars C.P.M.* A comparison of bacterial sulfate reduction and methanogenesis in the anaerobic sediments of a stratified lake ecosystem // *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* — 1984. — Vol. 19. — P. 191—199.
11. *Naguib M.* A rapid method for the quantitative estimation of dissolved methane and its application in ecological research // *Arch. Hydrobiol.* — 1978. — Vol. 82. — P. 66—73.
12. *Sorrell B.K., Boon P.J.* Biogeochemistry of billabong sediments. 2. Seasonal variations in methane production // *Freshwater Biol.* — 1992. — Vol. 27, N 3. — P. 435—445.

Институт биологии внутренних вод РАН,  
Борок, РФ

Поступила 24.11.14